

**สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง**

**การใช้ประโยชน์จากขี้เถ้าลอยสำหรับผลิตอิฐมวลเบา**

**UTILIZATION OF FLY ASH FOR LIGHT BLOCK CONCRETE**



เลขหาง.....  
เลขหนังสือ..... **62382**.....  
วันที่..... **10 ต.ค. 2549**.....

b.....  
i.....

**ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2548**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การใช้ประโยชน์จากขี้เถ้าลอยสำหรับผลิตอิฐมวลเบา  
UTILIZATION OF FLY ASH FOR LIGHT BLOCK CONCRETE



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2548

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2548

ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การใช้ประโยชน์จากขี้เถ้าลอยสำหรับผลิตอิฐมวลเบา

Utilization of Fly Ash for Light Block Concrete

ผู้จัดทำ

1. นายกฤษณะ เจริญคลัง รหัสประจำตัว 46015476
2. นายมานูญ บุญมา รหัสประจำตัว 46015501



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การใช้ประโยชน์จากซีเมนต์สำหรับผลิตอิฐมวลเบา

นายกฤษณะ เจริญคลัง  
 นายมานูญ บุญมา  
 ผศ.ดร. วัชระ เพิ่มชาติ อาจารย์ที่ปรึกษา  
 อ. ปริชานันท์ ศรีแก้ว อาจารย์ที่ปรึกษา  
 ปีการศึกษา 2548

### บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นการศึกษาวิจัยร่วมกับ บริษัท Professional Block จำกัด ซึ่งเป็นผู้ผลิตและจำหน่ายอิฐมวลเบาชนิดไม่อบไอน้ำ การศึกษานี้มุ่งพัฒนาการผลิตอิฐมวลเบาให้มีคุณภาพดีขึ้น ในขณะเดียวกันจะช่วยลดต้นทุนการผลิตด้วย โดยการนำซีเมนต์ด้านหินและซีเมนต์แกลบมาเป็นส่วนผสมในการผลิต การดำเนินงานแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน คือ 1) ศึกษาคุณสมบัติที่เปลี่ยนไปของอิฐมวลเบาเดิมของบริษัทฯ เมื่อผสมซีเมนต์ที่อัตราส่วนต่างๆ คุณสมบัติของอิฐที่ศึกษา ได้แก่ ค่าความแข็งแรงและค่าการนำความร้อน 2) สร้างห้องทดสอบขนาด  $2.3 \times 2.3 \text{ m}^2$  สูง 2.4 m โดยใช้อิฐมอญและอิฐมวลเบาที่ผสมซีเมนต์ ทำการวัดอุณหภูมิภายในห้องเพื่อเปรียบเทียบกัน

ผลการศึกษาพบว่า อัตราส่วนผสมซีเมนต์ของทั้งด้านหินและแกลบที่ร้อยละ 12.5 โดยน้ำหนัก จะให้ค่าความแข็งแรงสูงที่สุด โดยอิฐมวลเบาที่ผสมซีเมนต์ด้านหินขนาด  $\phi < 150 \mu\text{m}$  จะให้ค่าความแข็งแรงที่  $81 \text{ kg/cm}^2$  ในขณะที่อิฐมวลเบาที่ผสมซีเมนต์ด้านหินขนาด  $\phi 150 - 300 \mu\text{m}$  และซีเมนต์แกลบ จะให้ค่าความแข็งแรงที่ 50 และ  $31 \text{ kg/cm}^2$  ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าค่าการนำความร้อนของอิฐมวลเบาจะมีค่าลดลงตามอัตราส่วนซีเมนต์ที่ผสมเพิ่มขึ้น และอิฐที่ผสมซีเมนต์แกลบจะให้ค่าการนำความร้อนต่ำกว่าซีเมนต์ด้านหิน ส่วนผลการวัดอุณหภูมิภายในห้องทดสอบพบว่า ห้องที่สร้างจากอิฐมวลเบาที่มีค่าต่ำกว่าห้องที่สร้างจากอิฐมอญเฉลี่ย  $1.0 - 1.5 ^\circ\text{C}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Utilization of Fly Ash for Light Block Concrete

Mr. Kitsana Chroenklang

Mr. Manoon Boonma

Asst.Prof.Dr. Watchara Permchart Advisor

Mr. Prechanan Srikaew Advisor

2005

### ABSTRACT

This project presents the collaborated research work with Professional Block Co., Ltd to develop Light Block Concrete (referred to as LBC) without steam drying by using two kinds of fly ashes, namely, those from lignite and rice husk, as one mixture for producing of LBC. The work is sub-divided into two parts; 1) study of the changes of properties (i.e. compressive strength and thermal conductivity) of the original LBC when it is blended with fly ashes and, 2) construct two testing rooms with the dimension of  $2.3 \times 2.3 \text{ m}^2$  and 2.4 m high by using brick as well as LBC blended with fly ash. Eventually, their mean room temperatures have been compared.

The experimental results have shown that the compressive strengths at the mixing ratio of 12.5 %wt. of fly ashes from both lignite and rice husk have the maximum values. Meanwhile, the strengths of LBC blended with fine lignite ash ( $\phi < 150 \mu\text{m}$ ) and those mixed with coarse lignite ash ( $\phi = 150 - 300 \mu\text{m}$ ) as well as rice husk ash are about 81, 50 and 31  $\text{kg/cm}^2$ , respectively. Moreover, the thermal conductivities of LBCs have been found to be decreased with an increasing in mixing ratio of fly ash. Additionally, the temperature in LBC room has been found to be lower than that of brick room in the range of 1.0 – 1.5  $^{\circ}\text{C}$ .

## กิตติกรรมประกาศ

การที่ปริญญาบัตรนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีนั้น คณะผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ วัชระ เพิ่มชาติ และอาจารย์ ปรีชา นันท์ ศรีแก้ว ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา รวมถึงอาจารย์ทุกๆ ท่านที่ ให้นำแนวความคิด พร้อมทั้งให้คำแนะนำในการทำปริญญาบัตรฉบับนี้ ตลอดจนการแก้ปัญหาต่างๆ และการช่วยเหลือในด้านอื่นๆ อีกอย่างดียิ่ง อันประโยชน์ในการจัดทำปริญญาบัตรฉบับนี้ขึ้นมา ขอขอบพระคุณ โครงการให้ทุนสนับสนุนโครงการอุตสาหกรรมสำหรับนักศึกษาปริญญาตรี (IRPUS) ที่ได้ให้เงินทุนในการทำโครงการฉบับนี้ ซึ่งมีส่วนสำคัญในโครงการฉบับนี้ ขอขอบคุณบริษัท Professional Block จำกัด จ. อ่างทอง ที่ได้ให้คณะผู้จัดทำเข้าไปทำการวิจัยโดยใช้เครื่องมือและวัสดุที่เป็นส่วนผสม ในการทดลองของทางบริษัท ขอขอบคุณบริษัท กรุงเทพผลิตผลอุตสาหกรรม จำกัด มหาชน ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ในเรื่องถ้ำลอยถ่านหิน ขอขอบคุณบริษัท Biomass power จำกัด ที่ได้ให้ความ อนุเคราะห์ในเรื่องถ้ำลอยถ่านหิน การทำปริญญาบัตรฉบับนี้สำเร็จ ขอกราบขอบพระคุณกรรมการ ควบคุมการสอบปริญญาบัตรทุกท่าน ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำต่างๆ รวมทั้งคณาจารย์ภาควิชากรรม เกษตรทุกท่าน

คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณ คุณจิตราพร กังสวัสดิ์ คุณพัชรา เอมอำไพวงศ์ และคุณน้อย ประทีป ที่ได้ให้ความช่วยเหลือทางด้านธุรการ ตลอดจน นายอภิย์ คำหัง และนายเข้ม สมบูรณ์ เจ้าหน้าที่อาคารปฏิบัติการวิศวกรรมเกษตร ที่ได้ให้ความช่วยเหลือทางเครื่องมือ และอุปกรณ์ต่างๆ

อีกทั้งคณะผู้จัดทำ ขอขอบคุณเพื่อนๆ ทุกคน และผู้ที่เกี่ยวข้องในการทำปริญญาบัตรฉบับนี้ ไม่ว่าจะป็นทั้งที่ปรึกษา และช่วยเหลือรวมถึงเป็นกำลังใจให้แก่กลุ่มของผู้จัดทำจนทำให้ปริญญา บัตรฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ทางคณะผู้จัดทำ ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ที่ได้เป็นกำลังใจ ในการทำ ปริญญาบัตรฉบับนี้จนสำเร็จได้ด้วยดี ซึ่งทางคณะผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้งเป็นอย่างยิ่ง จึงขอกราบ ขอบพระคุณท่านทั้งสองไว้ ณ โอกาสนี้ด้วย

คณะผู้จัดทำ

## สารบัญ

เรื่อง	หน้าที่
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูปภาพ	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มา	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 แหล่งที่มาของซีเมนต์ลอยถ่านหิน	3
2.2 องค์ประกอบทางเคมีและองค์ประกอบของแร่ในถ่านลอย	3
2.2.1 ถ่านลอย Class C	6
2.2.2 ถ่านลอย Class F	7
2.3 คุณสมบัติทางกายภาพ	8
2.3.1 รูปร่างของอนุภาค	8
2.3.2 ความละเอียด	9
2.3.3 ความถ่วงจำเพาะ	10
2.4 ปฏิกริยาทางเคมีของถ่านลอยในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	10
2.5 แรงตามแนวแกน และความเค้นในแนวตั้งฉาก	12
2.6 การนำความร้อน (Conduction)	16
2.7 การพาความร้อน (Convection)	17
2.8 การแผ่รังสีความร้อน (Radiation)	17
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	18
บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงาน	23
3.1 การเตรียมวัสดุและอุปกรณ์	23
3.2 การจัดเตรียมส่วนผสมผลิตอิฐมวลเบา	26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

3.3	วิธีการทดลอง	29
3.3.1	การทดลองตอนที่ 1	29
	วิธีการทดลองโดยใช้ถ้ำลอยถ่านหินเป็นส่วนผสม	29
	วิธีการทดลองโดยใช้ถ้ำลอยแคลสเป็นส่วนผสม	33
3.3.2	การทดลองตอนที่ 2	35
	วิธีการทำอิฐมวลเบาผสมถ้ำลอยแคลส	36
บทที่ 4	ผลการทดลอง	41
4.1	ผลการการทดลองตอนที่ 1	41
4.1.1	ผลการทดสอบหาค่าความแข็งแรงและความหนาแน่น	41
4.1.2	ค่าความแข็งแรงของถ้ำลอยถ่านหินขนาด $\phi = 150 - 300 \mu\text{m}$	43
4.1.3	ค่าความแข็งแรงของถ้ำลอยถ่านหินขนาด $\phi < 150 \mu\text{m}$	44
4.1.4	ค่าความแข็งแรงของถ้ำลอยแคลสขนาด $\phi < 150 \mu\text{m}$	45
4.1.5	ผลการทดสอบค่าการนำความร้อนของถ้ำลอยถ่านหิน	46
4.1.6	ผลการทดสอบค่าการนำความร้อนของถ้ำลอยแคลส	46
4.1.7	การเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงและค่าการนำความร้อน	47
4.2	ผลการทดลองตอนที่ 2	48
4.2.1	ผลต่างอุณหภูมิผนังด้านนอกกับด้านในของอิฐมอดูด้านทิศ ตะวันออก	48
4.2.2	ผลต่างอุณหภูมิผนังด้านนอกกับด้านในของอิฐมอดูด้านทิศ ตะวันตก	48
4.2.3	ผลต่างอุณหภูมิผนังด้านนอกกับด้านในของอิฐมอดูด้านทิศใต้	49
4.2.4	ผลต่างอุณหภูมิผนังด้านนอกกับด้านในของอิฐมอดูด้านทิศ เหนือ	49
4.2.5	ผลต่างอุณหภูมิผนังด้านนอกกับด้านในของอิฐมวลเบาผสมถ้ำ ลอยแคลสด้านทิศตะวันออก	50
4.2.6	ผลต่างอุณหภูมิผนังด้านนอกกับด้านในของอิฐมวลเบาผสมถ้ำ ลอยแคลสด้านทิศตะวันตก	50
4.2.7	ผลต่างอุณหภูมิผนังด้านนอกกับด้านในของอิฐมวลเบาผสมถ้ำ ลอยแคลสด้านทิศใต้	51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

	4.2.8 ผลต่างคุณสมบัติผนังด้านนอกกับด้านในของอิฐมวลเบาผสมเถ้า ลอยแกลบด้านทิศเหนือ	51
	4.2.9 เปรียบเทียบผลต่างคุณสมบัติผนังด้านนอกกับด้านในของอิฐ มอญกับอิฐมวลเบาผสมเถ้าลอยแกลบ	52
บทที่ 5	บทสรุป	53
	ข้อเสนอแนะ	54
	เอกสารอ้างอิง	55
	ภาคผนวก	56
	ภาคผนวก ก.1 ค่าความแข็งแรงของการใช้เถ้าลอยผ่านหินคัดแยก ขนาด $\phi$ < 150 $\mu\text{m}$ ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก	57
	ภาคผนวก ก.2 ค่าความแข็งแรงของการใช้เถ้าลอยผ่านหินคัดแยก ขนาด $\phi$ < 150 $\mu\text{m}$ ร้อยละ 12.5 โดยน้ำหนัก	58
	ภาคผนวก ก.3 ค่าความแข็งแรงของการใช้เถ้าลอยผ่านหินคัดแยก ขนาด $\phi$ < 150 $\mu\text{m}$ ร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก	59
	ภาคผนวก ก.4 ค่าความแข็งแรงของการใช้เถ้าลอยผ่านหินคัดแยก ขนาด $\phi$ < 150 $\mu\text{m}$ ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก	60
	ภาคผนวก ก.5 ค่าความแข็งแรงของการใช้เถ้าลอยผ่านหินคัดแยก ขนาด $\phi$ 150 – 300 $\mu\text{m}$ ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก	61
	ภาคผนวก ก.6 ค่าความแข็งแรงของการใช้เถ้าลอยผ่านหินคัดแยก ขนาด $\phi$ 150 – 300 $\mu\text{m}$ ร้อยละ 12.5 โดยน้ำหนัก	62
	ภาคผนวก ก.7 ค่าความแข็งแรงของการใช้เถ้าลอยผ่านหินคัดแยก ขนาด $\phi$ 150 – 300 $\mu\text{m}$ ร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก	63
	ภาคผนวก ก.8 ค่าความแข็งแรงของการใช้เถ้าลอยผ่านหินคัดแยก ขนาด $\phi$ 150 – 300 $\mu\text{m}$ ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก	64
	ภาคผนวก ก.9 ค่าความแข็งแรงของการใช้เถ้าลอยแกลบ ขนาด $\phi$ < 150 $\mu\text{m}$ ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก	65
	ภาคผนวก ก.10 ค่าความแข็งแรงของการใช้เถ้าลอยแกลบ ขนาด $\phi$ < 150 $\mu\text{m}$ ร้อยละ 12.5 โดยน้ำหนัก	66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

ภาคผนวก ก.11 ค่าความแข็งแรงของการใช้เส้นลวดเคลือบ ขนาด $\phi < 150$ $\mu\text{m}$ ร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก	67
ภาคผนวก ก.12 ค่าความแข็งแรงของการใช้เส้นลวดเคลือบ ขนาด $\phi < 150$ $\mu\text{m}$ ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก	68



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	องค์ประกอบทางเคมีและกายภาพของเถ้าลอยจากแหล่งต่างๆ	5
2.2	องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และเถ้าลอยจาก 5 แหล่งที่ผลิตได้ใน ประเทศไทย	6
2.3	ค่าการนำความร้อนของวัสดุบางชนิดที่อุณหภูมิห้อง	16
2.4	ชั้นคุณภาพและชนิดของคอนกรีตมวลเบา	21
2.5	ขนาดของคอนกรีตมวลเบา	22
3.1	การใช้เถ้าลอยถ่านหินขนาดต่ำกว่า 150 $\mu\text{m}$ เพื่อทำตัวอย่างทดสอบ	30
3.2	การใช้เถ้าลอยถ่านหินขนาด 150 - 300 $\mu\text{m}$ เพื่อทำตัวอย่างทดสอบ	30
3.3	การใช้เถ้าลอยแกลบต่ำกว่า 150 $\mu\text{m}$ เพื่อทำตัวอย่างทดสอบ	33
3.4	การใช้เถ้าลอยแกลบต่ำกว่า 150 $\mu\text{m}$ เป็นส่วนผสมผลิตอิฐมวลเบา	36
4.1	ค่าความแข็งแรงและความหนาแน่นของการใช้เถ้าลอยถ่านหินเป็นส่วนผสมขนาด 300 - 150 $\mu\text{m}$	41
4.2	ค่าความแข็งแรงและความหนาแน่นของการใช้เถ้าลอยถ่านหินเป็นส่วนผสมขนาดต่ำกว่า 150 $\mu\text{m}$	41
4.3	ค่าความแข็งแรงและความหนาแน่นของการใช้เถ้าลอยแกลบเป็นส่วนผสมขนาดต่ำกว่า 150 $\mu\text{m}$	42
5.1	เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการสร้างผนังอาคาร โดยใช้อิฐแบบต่างๆ (บาทต่อตารางเมตร)	53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูปภาพ

รูปที่		หน้าที่
2.1	ความเค้นในแนวตั้งฉาก	12
2.2	แรงตามแนวแกน	12
2.3	ความเค้นบนพื้นที่ $\Delta A$	13
2.4	แรงกระทำบนหน้าตัดในแท่งวัสดุเพียว	14
2.5	แรงกระทำที่จุดเซนทรอยด์	15
2.6	แรงตรงศูนย์	15
2.7	ขนาดของคอนกรีตมวลเบา	22
3.1	บล็อกหล่อลูกปูน	23
3.2	แบบหล่อแผ่นทดสอบความร้อน	24
3.3	เครื่องทดสอบความแข็งแรง	24
3.4	เครื่องฉีดสารเคมี	25
3.5	เครื่องผสมปูน	25
3.6	โฟมอินทรีย์	26
3.7	เด้าลอยถ่านหินขนาด 150 - 300 $\mu\text{m}$	27
3.8	เด้าลอยแคลส	27
3.9	ปูนซีเมนต์	28
3.10	ทราย	28
3.11	การฉีดโฟมอินทรีย์ของเด้าลอยถ่านหิน	31
3.12	การทดสอบผสมในบล็อกทรงกระบอกของเด้าลอยถ่านหิน	31
3.13	การทดสอบผสมในแบบสี่เหลี่ยมของเด้าลอยถ่านหิน	32
3.14	ส่วนผสมที่จับตัวกันแล้วของเด้าลอยถ่านหิน	32
3.15	การทดสอบผสมในบล็อกทรงกระบอกของเด้าลอยแคลส	34
3.16	การทดสอบผสมในแบบสี่เหลี่ยมของเด้าลอยแคลส	34
3.17	ส่วนผสมที่จับตัวกันแล้วของเด้าลอยแคลส	35
3.18	ชุดควบคุมน้ำหนัก	36
3.19	การชั่งน้ำหนักของเด้าลอยแคลส	36
3.20	การฉีดโฟมอินทรีย์เพื่อผลิตอิฐมวลเบาเพื่อใช้งานจริง	37
3.21	แบบหล่อก้อนอิฐ	37
3.22	การชุบคลายก้อนอิฐ	38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่		หน้าที่
3.23	ก้อนอิฐที่ตากแดดแล้ว	38
3.24	ห้องทดสอบอิฐมอญ	39
3.25	ห้องทดสอบอิฐมวลเบาที่ผสมเถ้าลอยแกลบ	39
3.26	ห้องทดสอบอิฐมอญสมบูรณ์	39
3.27	ห้องทดสอบอิฐมวลเบาที่ผสมเถ้าลอยแกลบสมบูรณ์	39
3.28	การติดตั้งเทอร์โมคัปเปิ้ล	40
3.29	เครื่องวัดอุณหภูมิ	40
3.30	เครื่องวัดความชื้นอากาศและอุณหภูมิภายนอก	40
4.1	ความสัมพันธ์ระหว่าง Strength กับ Ash fraction ของฉนวนหินขนาด 150 – 300 $\mu\text{m}$	43
4.2	ความสัมพันธ์ระหว่าง Density กับ Ash fraction ของฉนวนหินขนาด 150 – 300 $\mu\text{m}$	43
4.3	ความสัมพันธ์ระหว่าง Strength กับ Ash fraction ของฉนวนหินขนาดต่ำกว่า 150 $\mu\text{m}$	44
4.4	ความสัมพันธ์ระหว่าง Density กับ Ash fraction ของฉนวนหินขนาดต่ำกว่า 150 $\mu\text{m}$	44
4.5	ความสัมพันธ์ระหว่าง Strength กับ Ash fraction ของเถ้าลอยแกลบ	45
4.6	ความสัมพันธ์ระหว่าง Density กับ Ash fraction ของเถ้าลอยแกลบ	45
4.7	ความสัมพันธ์ระหว่าง Thermal conductivity กับ Ash fraction ของเถ้าลอยฉนวนหิน	46
4.8	ความสัมพันธ์ระหว่าง Thermal conductivity กับ Ash fraction ของเถ้าลอยแกลบ	46
4.9	ค่าความแข็งแรงของอิฐมวลเบาที่อัตราส่วนผสมต่างๆของเถ้าลอยฉนวนหินและเถ้าลอยแกลบ	47
4.10	ค่าการนำความร้อนของอิฐมวลเบาที่อัตราส่วนผสมต่างๆของเถ้าลอยฉนวนหินและแกลบ	47
4.11	ผลต่างอุณหภูมิผนังด้านนอกกับด้านในของอิฐมอญด้านทิศตะวันออก	48
4.12	ผลต่างอุณหภูมิผนังด้านนอกกับด้านในของอิฐมอญด้านทิศตะวันตก	48
4.13	ผลต่างอุณหภูมิผนังด้านนอกกับด้านในของอิฐมอญด้านทิศใต้	49
4.14	ผลต่างอุณหภูมิผนังด้านนอกกับด้านในของอิฐมอญด้านทิศเหนือ	49
4.15	ผลต่างอุณหภูมิผนังด้านนอกกับด้านในของอิฐมวลเบาผสมเถ้าลอยแกลบด้านทิศตะวันออก	50
4.16	ผลต่างอุณหภูมิผนังด้านนอกกับด้านในของอิฐมวลเบาผสมเถ้าลอยแกลบด้านทิศตะวันตก	50
4.17	ผลต่างอุณหภูมิผนังด้านนอกกับด้านในของอิฐมวลเบาผสมเถ้าลอยแกลบด้านทิศใต้	51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่		หน้าที่
4.18	ผลต่อแรงอุณหภูมิผนังด้านนอกกับด้านในของอิฐมวลเบาผสมเถ้าลอยแกลบด้านทิศเหนือ	51
4.19	เปรียบเทียบผลต่อแรงอุณหภูมิผนังด้านนอกกับด้านในของอิฐมวลเบาผสมเถ้าลอยแกลบ	52



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

ในอดีตจนถึงปัจจุบันวัสดุหลักที่ใช้ในการก่อสร้างอาคารบ้านเรือน ได้แก่ ไม้ อิฐบล็อก และอิฐมอญ แต่ในปัจจุบันไม่มีราคาแพงทำให้อิฐบล็อกและอิฐมอญเป็นทางเลือกหนึ่งที่มีความนิยมอย่างแพร่หลายในการนำไปใช้งานในธุรกิจก่อสร้าง แต่ในปัจจุบันได้มีการนำอิฐมวลเบาซึ่งมีคุณสมบัติที่โดดเด่นกว่าอิฐบล็อกและอิฐมอญ ในเรื่องการกันความร้อนและมีน้ำหนักที่เบากว่าเข้ามาใช้ในการก่อสร้างอาคารบ้านเรือน เนื่องจากอิฐมวลเบา มีคุณสมบัติเป็นฉนวนกันความร้อน ทำให้ความร้อนจากภายนอกอาคารเข้าสู่ภายในตัวอาคารได้น้อยลง ซึ่งช่วยลดภาระการทำงานของเครื่องปรับอากาศ ทำให้สามารถช่วยลดปริมาณการใช้ไฟฟ้าลงได้

แต่อย่างไรก็ตามราคาของอิฐมวลเบา ยังคงมีราคาค่อนข้างสูงมากเมื่อเทียบกับราคาอิฐบล็อกและอิฐมอญ เนื่องจากการผลิตอิฐมวลเบาใช้เทคโนโลยีการผลิตจากต่างประเทศ อีกทั้งผู้ผลิตยังมีน้อย ซึ่งในปัจจุบันมีผู้ผลิตในประเทศไทยอยู่ 4 บริษัท คือ (1) บริษัท Quality Construction จำกัด (2) บริษัท SuperBlock จำกัด (3) บริษัท Thai Light Block and Panel จำกัด และ (4) บริษัท Aerocrete จำกัด ทำให้ราคาค่อนข้างสูง อีกทั้งปริมาณการผลิตไม่เพียงพอต่อความต้องการของผู้บริโภค อย่างไรก็ตามมีผู้ประกอบการบางแห่งให้ความสนใจ และเริ่มมีการผลิตอิฐมวลเบาเพิ่มขึ้น แต่กระบวนการผลิตนั้น ไม่ได้พึ่งพาเทคโนโลยีจากต่างประเทศ ทำให้คุณสมบัติของอิฐมวลเบา ยังไม่เทียบเท่ากับอิฐมวลเบาที่ผลิตจากทั้ง 4 บริษัทดังกล่าว

ดังนั้นโครงการนี้ จึงมุ่งศึกษาและพัฒนาการผลิตอิฐดังกล่าว เพื่อตอบสนองความต้องการของผู้ผลิตที่จะพัฒนาผลิตภัณฑ์ โดยไม่ต้องพึ่งพาเทคโนโลยีจากต่างประเทศ เพื่อให้มีคุณภาพใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์ที่ผลิตโดยใช้เทคโนโลยีจากต่างประเทศ และที่สำคัญคือ ให้มีคุณภาพที่ดีกว่าอิฐบล็อกธรรมดาและอิฐมอญ โดยได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัท Professional Block จำกัด ในการร่วมดำเนินโครงการเพื่อหาแนวทางในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ และได้รับบสนับสนุนการทำโครงการจาก สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ภายใต้โครงการให้ทุนสนับสนุนโครงการอุตสาหกรรมสำหรับนักศึกษาปริญญาตรี รหัสโครงการที่ 14806006 ประจำปีงบประมาณ 2548

## 1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาการใช้ประโยชน์จากขี้เถ้าลอย (Fly ash) ของเชื้อเพลิงถ่านหินและเชื้อเพลิงแกลบ เพื่อเป็นส่วนผสมในการผลิตอิฐมวลเบาแบบไม่อบไอน้ำ สำหรับงานก่อสร้างผนังอาคาร

## 1.3 ขอบเขตของการศึกษา

- 1) ศึกษาการนำขี้เถ้าลอยของถ่านหินและแกลบเพื่อนำมาเป็นส่วนผสมในการผลิตอิฐมวลเบา สำหรับงานก่อผนังอาคาร
- 2) ศึกษาคุณสมบัติที่สำคัญของอิฐมวลเบาเปรียบเทียบกับอิฐมอญ ได้แก่ ค่าความแข็งแรง และค่าการนำความร้อน

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ได้สูตรผสมการผลิตอิฐมวลเบาที่มีส่วนผสมของขี้เถ้าลอยจากแกลบและถ่านหิน ที่สามารถนำไปผลิตอิฐมวลเบาเพื่อใช้ในการก่อสร้างจริงได้
- 2) ลดต้นทุนในการผลิตอิฐมวลเบาเมื่อเทียบกับเทคโนโลยีจากต่างประเทศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 แหล่งที่มาของซีเมนต์ลอมถ่านหิน

เนื่องจากการใช้ถ่านหินเพื่อเป็นเชื้อเพลิงในโรงไฟฟ้ามีเพิ่มขึ้น เป็นผลให้มีเถ้าลอมเพิ่มขึ้นมากมายหลายแหล่งในสหรัฐอเมริกา แคนาดา ญี่ปุ่น ไทย และที่อื่นๆ ทั่วโลก โดยทั่วไปเถ้าลอมซึ่งได้จากการเผาถ่านหินบดมักมีความละเอียดสามารถผ่านตะแกรงเบอร์ 200 (ช่องเปิด 75 mm) ในปริมาณร้อยละ 70-80 โดยน้ำหนักมาตรฐาน ASTM C 618 ได้แบ่งเถ้าลอมสำหรับใช้ในงานคอนกรีตออกเป็น 2 ชนิด คือ Class F และ Class C โดยเถ้าลอม Class F มักได้จากการเผาถ่านหินประเภทแอนทราไซต์หรือบิทูมินัส ส่วนเถ้าลอม Class C มักได้จากการเผาถ่านหินประเภทซับบิทูมินัสหรือลิกไนต์

ถ่านหินประเภทบิทูมินัสและแอนทราไซต์ส่วนมากมักมีแร่แคลเซียมในปริมาณต่ำ ส่วนถ่านหินประเภทซับบิทูมินัสและลิกไนต์อาจมีปริมาณแคลเซียมสูงหรือต่ำก็ได้ การแบ่งเถ้าลอมออกเป็น 2 ชนิด สะท้อนให้เห็นถึงความแตกต่างในองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอมซึ่งมีผลต่อคุณสมบัติการเป็นวัสดุประสาน และคุณสมบัติทางปฏิกิริยาของเถ้าลอมโดยตรง เถ้าลอม Class C มักจะมีคุณสมบัติในการ เป็นวัสดุประสานเนื่องจากมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ค่อนข้างสูงรวมทั้งมีคุณสมบัติทางปฏิกิริยาด้วย ในขณะที่เถ้าลอม Class F แทบจะไม่มีคุณสมบัติในการเป็นวัสดุประสานเลยเมื่อผสมกับน้ำเนื่องจากมีปริมาณของแคลเซียมออกไซด์ต่ำ

ในสหรัฐอเมริกามีการผลิตเถ้าลอมประมาณ 50 ล้านตันใน ค.ศ. 1987 แต่นำมาใช้ในการผสมคอนกรีตเพียงประมาณร้อยละ 10 ของจำนวนที่ผลิตได้เท่านั้น สำหรับข้อมูลในประเทศไทยพบว่าแหล่งผลิตเถ้าลอมที่ใหญ่ที่สุดคือที่โรงไฟฟ้าของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ซึ่งผลิตได้ประมาณ 3 ล้านตันต่อปี [5] และมีเถ้าลอมจากแหล่งอื่นๆอีกประมาณ 2 ถึง 3 แสนตันต่อปี เฉพาะที่แหล่งแม่เมาะแห่งเดียวพบว่าการใช้เถ้าลอมมีการเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ กล่าวคือ มีการใช้เถ้าลอมในช่วงก่อน พ.ศ. 2535 จำนวนน้อยกว่า 500 ตันต่อปี เพิ่มขึ้นเป็นประมาณ 300,000 ตันในปี พ.ศ. 2541 และเพิ่มเป็นประมาณ 600,000 ตันในปี พ.ศ. 2542 และในปี พ.ศ. 2543 คาดว่าจะมีการใช้เถ้าลอมในงานก่อสร้างต่างๆรวมประมาณ 8 แสนตันและมีแนวโน้มของการนำไปใช้เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ [6]

#### 2.2 องค์ประกอบทางเคมีและองค์ประกอบของแร่ในเถ้าลอม

เถ้าลอมมีองค์ประกอบทางเคมีและเฟสที่ซับซ้อนซึ่งประกอบด้วยเนื้อที่แตกต่างกัน (Heterogeneous phase) คือส่วนที่ไม่เป็นผลึก (Glassy phase) และส่วนที่เป็นผลึก (Crystalline phase) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1 แสดงถึงองค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของเถ้าลอย Class F และ Class C ที่รวบรวมมาจากแหล่งเถ้าลอยในอเมริกาเหนือ ซึ่งเถ้าลอยส่วนใหญ่ได้มาจากการเผาด่านหินประเภทบิทูมินัส ซับบิทูมินัสและลิกไนต์ ส่วนตารางที่ 2 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และเถ้าลอยในประเทศไทยจำนวน 5 แหล่งผลิต โดยแหล่งผลิตที่ใหญ่ที่สุดคือจากโรงไฟฟ้า ที่อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง

โดยทั่วไปเถ้าลอยจะมีส่วนประกอบหลักที่สำคัญอยู่ 3 ชนิด คือ  $\text{SiO}_2$  (ประมาณร้อยละ 25-60),  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (ประมาณร้อยละ 10-30), และ  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (ประมาณร้อยละ 5-25) หากผลรวมขององค์ประกอบ ทั้ง 3 นี้ มากกว่าหรือเท่ากับร้อยละ 70 ASTM จัดเถ้าลอยดังกล่าวเป็นเถ้าลอย Class F สำหรับเถ้าลอย Class C ส่วนใหญ่จะมีสารประกอบของแคลเซียมออกไซด์ในปริมาณสูง ดังนั้น ASTM จึงกำหนดผลรวมขององค์ประกอบหลักทั้ง 3 ชนิดดังกล่าวให้มากกว่าหรือเท่ากับร้อยละ 50 เท่านั้น

ปริมาณแมกนีเซียมออกไซด์ในเถ้าลอยโดยทั่วไปมักจะน้อยกว่าร้อยละ 5 ส่วนปริมาณของแอลคาไลออกไซด์เทียบเท่า (Equivalent  $\text{Na}_2\text{O} = \text{Na}_2\text{O} + 0.658 \text{K}_2\text{O}$ ) โดยทั่วไปในเถ้าลอย Class F จะมีน้อยกว่าร้อยละ 5 แต่เถ้าลอย Class C อาจจะมีมากกว่าร้อยละ 10 เถ้าลอย Class C จะมีค่าการสูญเสียน้ำหนัก เนื่องจากการเผา (Loss On Ignition, LOI) น้อยกว่าร้อยละ 1 แต่เถ้าลอย Class F อาจมีค่าดังกล่าวอยู่ระหว่างร้อยละ 1 ถึง 10 อย่างไรก็ตามเถ้าลอยที่ใช้ในคอนกรีตควรมีค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาไม่เกินร้อยละ 6

ส่วนประกอบที่สำคัญที่ทำให้ใหญ่เกิดปฏิกิริยาเคมีของเถ้าลอย Class F คือ ซิลิกาหรืออะลูมิโนซิลิเกต ส่วนในเถ้าลอย Class C คือ แคลเซียมอะลูมิโนซิลิเกต ส่วนประกอบรองอื่นๆ ทางเคมีของเถ้าลอยอาจมีปริมาณที่แปรเปลี่ยนได้ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับแหล่งกำเนิดของถ่านหิน ส่วนประกอบเหล่านี้ได้แก่ สารประกอบของไดเตเนียม เหล็ก แมกนีเซียม ฟอสฟอรัส ซัลเฟอร์ ออกซิเจน โบแทสเซียม โซเดียม คาร์บอน และสารประกอบอื่นๆ เล็กน้อย นอกเหนือจากคาร์บอนที่เผาไหม้ไม่สมบูรณ์แล้วเถ้าลอยบางชนิดยังมีส่วนของสารประกอบอินทรีย์ปนอยู่ด้วย นอกจากนี้วัสดุบางประเภทที่ใช้ในขบวนการเผาด่านหิน หรือในขบวนการคัดเก็บเถ้าลอย อาจมีผลต่อคุณสมบัติของเถ้าลอยได้ด้วย

โดยปกติมักไม่นิยมทำการวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนในเถ้าลอยโดยตรง แต่จะสมมติว่าปริมาณคาร์บอนมีค่าเท่ากับน้ำหนักที่สูญเสียเนื่องจากการเผา (LOI) อย่างไรก็ตามค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาจะรวมถึงปริมาณน้ำหรือคาร์บอนไดออกไซด์ที่สูญเสียไปจากการสลายตัวของสารประกอบประเภทไฮเดรตหรือคาร์บอเนตในขบวนการเผาด้วย

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีและกายภาพของเถ้าลอยจากแหล่งต่างๆ [11]

เถ้าลอย (หมายเลข บ่งบอก ที่มา)	คุณสมบัติทางเคมี (%)								คุณสมบัติทางกายภาพ		
	LOI	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	ข้างบน ตะแกรง เบอร์ 325, ร้อยละ	ความ ละเอียด ของ เบตน, ม <sup>2</sup> /กก	ความ ถ่วง จำเพาะ
มีปริมาณ CaO น้อยกว่าร้อยละ 10 (Class F ทั่วไป)											
FA-4*	1.0	6.7	58.5	19.9	5.6	1.7	1.5	1.3	17	379	2.31
FA-5*	0.9	0.7	60.1	27.8	3.8	1.0	0.3	2.8	18	262	2.18
FA-7*	1.8	1.7	56.0	25.7	8.3	1.1	0.3	2.8	22	282	2.28
FA-8*	2.6	2.4	49.0	21.3	17.9	1.0	0.4	2.7	20	282	2.45
FA-13*	4.2	1.7	45.0	19.6	23.9	0.9	0.4	2.3	24	236	2.45
FA-14*	3.0	1.9	47.7	29.5	9.7	0.7	0.3	1.9	28	287	2.30
FA-15*	2.5	1.3	52.7	28.6	5.8	1.0	0.3	2.4	17	351	2.38
FA-16*	4.0	1.6	50.6	27.6	8.2	1.0	0.4	2.5	4	508	2.49
FA-17*	0.4	7.5	49.8	21.6	7.0	1.7	2.8	0.7	24	316	2.27
FS-18*	4.3	2.2	43.6	26.0	16.6	0.9	0.3	1.9	17	337	2.24
No.3 <sup>1</sup>	7.2	3.2	64.4	24.7	3.9	1.5	-	-	2	-	-
D-Precip <sup>2</sup>	3.9	1.0	52.9	30.1	7.3	1.1	0.4	2.9	8	643	2.33
D-Mech. <sup>2</sup>	6.4	1.0	54.9	27.6	10.4	0.9	0.3	2.4	30	333	2.15
มีปริมาณ CaO มากกว่าร้อยละ 10 (Class C ทั่วไป)											
FA-1*	0.9	25.5	36.3	17.7	6.7	4.6	1.6	0.6	15	417	2.65
FA-2(a)*	1.9	15.5	38.8	13.4	22.5	1.5	0.5	1.9	16	355	2.74
FA-9(a)*	0.5	11.6	50.5	17.7	6.6	3.4	3.5	1.2	11	315	2.44
FA-10(a)*	0.5	28.2	35.9	17.1	5.6	5.1	1.8	0.5	16	390	2.70
FA-11(a)*	0.4	16.9	51.4	16.9	5.8	3.5	0.6	0.8	21	288	2.52
A+	0.4	17.3	35.7	20.3	5.8	4.3	6.5	0.8	11	418	2.67
F+	0.7	24.9	23.1	13.3	9.6	7.5	7.3	0.6	12	324	2.86
G+	0.6	11.7	48.9	21.3	3.7	2.7	6.4	0.9	38	310	2.31
I+	0.3	29.0	31.1	17.0	5.6	3.8	3.2	0.4	15	604	2.74

\* Collins และ Emery ค.ศ. 1982, 1 Burns, Guarnashelli และ Mcaskill ค.ศ. 1982, 2 Rose, Lowe และ Floy ค.ศ. 1979

+ Gebler และ Kileger ค.ศ. 1983

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และเถ้าลอยจาก 5 แหล่ง  
ที่ผลิตได้ใน ประเทศไทย

แหล่งผลิต	องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละ)								
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	LiO
ปูนซีเมนต์	20.62	5.22	3.10	64.99	0.91	0.07	0.50	2.70	1.13
แม่เมาะ	46.25	26.43	10.71	7.61	2.21	1.11	3.07	1.85	0.23
ระยอง	45.02	36.21	4.09	3.64	0.54	0.44	0.31	0.48	5.32
สมุทรสาคร	43.92	36.62	3.97	3.05	0.55	0.38	0.44	0.64	7.52
กาญจนบุรี	47.39	22.73	6.29	8.36	2.64	0.63	2.95	3.38	3.12
ต่างประเทศ	49.04	37.91	2.75	1.03	0.39	0.38	0.52	0.18	4.70

เถ้าลอยที่เย็นลงอย่างรวดเร็วจากสถานะหลอมเหลวจะทำให้องค์ประกอบในเถ้าลอยส่วนใหญ่อยู่ในสถานะที่ไม่เป็นผลึกมีเพียงบางส่วนเท่านั้นที่มีสถานะเป็นผลึกเช่น มุลไลต์ (Mullite), ควอตซ์ (Quartz), แมกนีไทต์หรือเฟอร์ไรต์สปินิล (Magnetite หรือ Ferrite spinel) และเฮมาไทต์ (Hematite) Roy, Luke และ Diamond ซึ่งให้เห็นว่าร้อยละ 60 ถึง 90 ของเถ้าลอยส่วนใหญ่จะอยู่ในสถานะที่ไม่เป็นผลึก ส่วนประกอบอื่นๆซึ่งอาจมีในเถ้าลอยที่มีปริมาณแคลเซียมสูง ได้แก่ เพอริเคลส (Periclase), แอนไฮไดรต์ (Anhydrite), แอลคาไลซัลเฟต (Alkali sulfate), เมลิไลต์ (Melilite), เมอร์วินิต (Merwinite), เนฟีไลต์ (Napheline), โซดาไลต์ (Sodalite), ไตรแคลเซียมซิลิเกต (C<sub>3</sub>S), ไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C<sub>3</sub>A) และอื่นๆ

### 2.2.1 เถ้าลอย Class C

เถ้าลอย Class C ส่วนใหญ่มักเป็นเถ้าลอยที่มีปริมาณแคลเซียมสูง นอกเหนือจากแคลเซียมอะลูมิโนซิลิเกตกลาส (Calcium aluminosilicate glass) ซึ่งเป็นส่วนที่ไวต่อการทำปฏิกิริยาเคมีแล้ว ยังมีปูนขาวอิสระ (Free lime, CaO), แอนไฮไดรต์ (anhydrite, CaSO<sub>4</sub>), ไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (Tricalcium aluminate, 3CaO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), แคลเซียมซัลโฟอะลูมิเนต (Calcium sulfoaluminate, 4CaO·3Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·SO<sub>3</sub>) และที่มีอยู่น้อยมาก คือ แคลเซียมซิลิเกต คุณสมบัติที่เกี่ยวข้องกับกำลังของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย Class C เมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย Class F มีอิทธิพลมาจากวัสดุประสานแคลเซียมอะลูมิโน-ซิลิเกตกลาส และในหลายกรณีจากสารประกอบที่เป็นผลึกชนิดอื่นๆ ที่สามารถเกาะหนูนให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันในเถ้าลอย Class C ได้

เถ้าลอย Class C ที่มีปริมาณแคลเซียมสูงมักทำปฏิกิริยากับน้ำโดยตรงทำให้เกิดสารที่มีคุณสมบัติเป็นวัสดุประสาน เช่น แคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์ (C-S-H), แคลเซียมไฮดรอกไซด์ และเอ็ททริงไต์ (Ettringite) นอกจากนี้ส่วนที่มีสถานะไม่เป็นผลึกซึ่งมีอยู่ในเถ้าลอย Class C มักจะมีปริมาณน้อยกว่าเถ้าลอย Class F แต่มีความไวต่อการทำปฏิกิริยามากกว่า โดยวัสดุส่วนที่ไม่เป็นผลึกนี้ จะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมและแอลคาไลไฮดรอกไซด์ที่ได้มาจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่าง ปูนซีเมนต์กับน้ำและบางส่วนของเถ้าลอยกับน้ำ

### 2.2.2 เถ้าลอย Class F

เถ้าลอย Class F มักมีปริมาณแคลเซียมต่ำส่วนใหญ่จะประกอบด้วย ส่วนที่ไม่เป็นผลึกของซิลิกาซึ่งมีปริมาณซิลิกาสูงและส่วนที่ไม่เป็นผลึก ซึ่งเกิดปฏิกิริยาได้น้อย ได้แก่ มุลไลต์, แมกนีไทต์หรือเฟอไรไรต์ สปิเนลและควอทซ์ เถ้าลอย Class C ชนิดที่มีปริมาณแคลเซียมสูง (มักมาจากถ่านหินประเภทลิกไนต์และซับบิทูมินัส) จะให้กำลังในระยะแรกสูงกว่าเถ้าลอยที่มีปริมาณแคลเซียมต่ำ (จากถ่านหินประเภทบิทูมินัส หรือแอนทราไซต์) เมื่อเปรียบเทียบที่การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยน้ำหนักเท่ากัน เนื่องจากมีปัจจัยทั้งทางเคมีและทางกายภาพที่แตกต่างกัน

องค์ประกอบทางเคมีของส่วนที่ไม่เป็นผลึกในเถ้าลอยจะมีความผันแปรค่อนข้างมากซึ่งมีผลต่อความสามารถในการทำปฏิกิริยา โครงสร้างส่วนที่ไม่เป็นผลึกเหล่านี้มีตั้งแต่ประเภทที่มีการจับยึดกันอย่างแข็งแรงของซิลิกาในเถ้าลอย Class F จนถึงโครงสร้างที่มีส่วนประกอบอื่นๆ แทรกอยู่มากในเถ้าลอย Class C ซึ่งส่วนประกอบ เหล่านี้อาจรวมถึงแอลคาไลเอิร์ท (Alkali earth), แอลคาไล (Alkali) และอะลูมิโนซิลิเกตกลาส (Aluminosilicate glasses) ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับโครงสร้างส่วนที่ไม่เป็นผลึกของตะกรันเตาถลุงเหล็ก (blast furnace slag) ส่วนที่ไม่เป็นผลึกชนิดที่มีปริมาณ ซิลิกาสูง จะไวต่อการทำปฏิกิริยากับน้ำน้อยกว่าส่วนที่ไม่เป็นผลึกชนิดอื่น ดังนั้นเถ้าลอย Class F จึงต้องการส่วนที่ไม่เป็นผลึกชนิดอื่นๆ ในปริมาณที่สูงขึ้นเมื่อเทียบกับเถ้าลอย Class C เพื่อให้เกิดประสิทธิผลเท่ากันในการทำปฏิกิริยา เมื่อใช้ร่วมกับปูนซีเมนต์ในคอนกรีต [6]

โดยทั่วไปส่วนที่ไม่เป็นผลึกที่มีปริมาณซิลิกาสูงมักทำปฏิกิริยาอย่างช้าๆกับไฮดรอกซิลแอลคาไลและแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่มาจากแอลคาไลและแคลเซียมไฮดรอกไซด์ แม้ว่าปฏิกิริยาปอซโซลานมีแนวโน้มที่จะใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ให้หมดไปแต่ปฏิกิริยาไฮดรอกไซด์ที่ต่อเนื่องของไคแคลเซียมซิลิเกต (C<sub>2</sub>S) และไตรแคลเซียมซิลิเกต (C<sub>3</sub>S) จากปูนซีเมนต์ก็จะปล่อยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ออกมาเรื่อยๆเช่นกัน นอกจากนั้นระดับการเกิดปฏิกิริยาของส่วนที่ไม่เป็นผลึกจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติเฉพาะของชนิดปูนซีเมนต์ และยังขึ้นอยู่กับปริมาณแอลคาไลของปูนซีเมนต์นั้นๆอีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.3 คุณสมบัติทางกายภาพ

รูปทรง ความละเอียด การกระจายของขนาดความหนาแน่น และส่วนประกอบของอนุภาคเถ้าลอยล้วนมีผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตสด คอนกรีตที่กำลังแข็งตัว และการพัฒนากำลังของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว เถ้าลอยซึ่งเป็นผลพลอยได้จากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าซึ่งตั้งอยู่ในที่ต่าง ๆ กันหรือมาจากแหล่งถ่านหินต่างแหล่งกันอาจมีสีต่างกัน ได้ สีของเถ้าลอยและปริมาณเถ้าลอยที่ใช้ในคอนกรีตจะส่งผลกระทบต่อสีของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วเช่นเดียวกับการเปลี่ยนสีของปูนซีเมนต์หรือการเปลี่ยนวัสดุผสม โดยทั่วไปสีของเถ้าลอยไม่มีส่วนเกี่ยวข้องกับคุณสมบัติทางวิศวกรรมของคอนกรีต แต่อาจเป็นตัวบ่งชี้ว่าเถ้าลอยมาจากแหล่งที่ต่างกัน หรือมีค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา และมีปริมาณเหล็กต่างกัน หรือผ่านสภาพการเผาที่แตกต่างกัน

### 2.3.1 รูปร่างของอนุภาค

ขนาดอนุภาคและรูปทรงของเถ้าลอยขึ้นอยู่กับแหล่งถ่านหิน ความสม่ำเสมอของถ่านหิน ความละเอียดของผงถ่านหินก่อนเผา สภาพการเผา (ระดับอุณหภูมิและปริมาณออกซิเจน) ความสม่ำเสมอของการเผา และวิธีการคัดจับเถ้าลอยที่ใช้ เช่น เป็นวิธีการแยกโดยเชิงกล (Mechanical separator) โดยใช้ถุงเก็บ (Bag filters) หรือโดยใช้เครื่องคัดจับแบบไฟฟ้าสถิต (Electrostatic precipitators) Lane และ Best พบว่ารูปทรงของเถ้าลอยเปลี่ยนแปลงไปตามขนาดของอนุภาค โดยอนุภาคของเถ้าลอยส่วนใหญ่จะไม่เป็นผลึก มีรูปทรงกลมซึ่งอาจตันหรือกลวง ลักษณะทรงกลมที่ภายในกลวง เรียกว่า เถ้าลอยกลวง (Cenospheres) บางส่วนจะเป็นทรงกลมกลวงบรรจุด้วยอนุภาคเล็กๆ อยู่ภายในที่รู้จักกันในนามของ Plerospheres อนุภาคที่เหลี่ยมมีลักษณะตั้งแต่โปร่งแสงจนถึงทึบแสง มีรูพรุนเล็กน้อยถึงเล็กน้อย มีรูปร่างที่กลมจนถึงรูปร่างยาวแบน เถ้าลอยที่มีรูพรุนมากมายมักเกิดจากการเผาถ่านหินด้วยอุณหภูมิที่ไม่สูงพอที่จะทำให้เถ้าลอยหลอมเหลวได้และเถ้าลอยที่ได้มักจะมีรูปทรงต่างๆกัน

การศึกษาในแถบทวีปยุโรปพบว่าการบดเถ้าลอยกับปูนซีเมนต์ร่วมกัน ในการผลิตปูนซีเมนต์ผสมสามารถช่วยปรับปรุงคุณสมบัติด้านกำลังให้ดีขึ้น การบดให้ละเอียดมากขึ้นจะทำให้เถ้าลอยกลวงแตกออกและเถ้าลอยแบบ Plerospheres ปลดอนุภาคเล็กๆ ที่อยู่ในออกมา อย่างไรก็ตามหากบดส่วนผสมของปูนเม็ดและเถ้าลอยจนละเอียดเกินไป ความต้องการน้ำของซีเมนต์ผสมจะเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีของการใช้เถ้าลอยที่ไม่ได้บด อย่างไรก็ตามการใช้ปูนซีเมนต์ผสมดังกล่าวยังคงใช้ปริมาณน้ำน้อยกว่ากรณีการใช้ปูนซีเมนต์ล้วนๆ เพราะปูนซีเมนต์ที่ผ่านการบดย่อยจะมีรูปร่างขรุขระ มีขนาดไม่แน่นอนและเป็นเหลี่ยมมุม

### 2.3.2 ความละเอียด

อนุภาคของเถ้าลอยมีหลากหลายขนาดตั้งแต่ขนาดเล็กกว่า 1 ไมโครเมตรจนถึงขนาดใหญ่กว่า 1 มิลลิเมตร โรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าแบบเก่ามักใช้วิธีคัดจับเถ้าลอยโดยการแยกเชิงกล ซึ่งจะได้อุณหภูมิลอยที่มีขนาดหยาบกว่าเมื่อเทียบกับเถ้าลอยที่ได้จากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าสมัยใหม่ซึ่งคัดจับเถ้าลอยด้วยเครื่องคัดจับแบบไฟฟ้าสถิตหรือใช้ถุงเก็บเถ้าลอยที่เหมาะสมสำหรับใช้เป็นวัสดุปอซโซลานในคอนกรีตมักมีอนุภาคขนาดเล็กซึ่งผ่านตะแกรงเบอร์ 325 (ช่องเปิด 45 $\mu$ m) โดยทั่วไปการกระจายขนาดอนุภาคของเถ้าลอยจากแหล่งผลิตหนึ่งๆ จะค่อนข้างคงที่ แต่ทั้งนี้ต้องไม่มีการเปลี่ยนแปลงแหล่งของถ่านหิน วิธีการบดถ่านหิน ขบวนการเผาถ่านหิน และกำลังการผลิตมากนัก

ความละเอียดของเถ้าลอยมีความสำคัญและส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติของคอนกรีตอย่างมาก Lane และ Best ใช้เถ้าลอยที่มีขนาดและอนุภาคผ่านตะแกรงเบอร์ 325 ตามมาตรฐาน ASTM C 430 เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความละเอียดของเถ้าลอย Class F กับคุณสมบัติบางประการของคอนกรีตพบว่า กำลังของคอนกรีต ความต้านทานต่อการกัดกร่อน และความต้านทานต่อการแข็งตัวและการสลายของน้ำสลับกัน (Freezing and thawing) มีความสัมพันธ์โดยตรงกับอัตราส่วนของเถ้าลอยที่มีขนาดเล็กกว่าตะแกรงเบอร์ 325 และสรุปได้ว่าความละเอียดเป็นปัจจัยบ่งชี้คุณสมบัติของเถ้าลอยที่ดีอย่างหนึ่งเมื่อใช้เถ้าลอยผสมในคอนกรีต และเมื่อเพิ่มความละเอียดของเถ้าลอยให้สูงขึ้นพบว่าคุณสมบัติที่ดีของคอนกรีตก็เพิ่มขึ้นด้วย

การทดสอบความละเอียดของเถ้าลอยนอกเหนือจากที่ ASTM C 430 ที่กำหนดให้ใช้วิธีร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 325 ก็คือการทดสอบพื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุ โดยวิธีของเบลน (Blaine fineness) ตาม ASTM C 204 การทดสอบเทอร์บิดิเมเตอร์ (Turbidimeter test) ตาม ASTM C 115 และการใช้ไฮโดรมิเตอร์ โดยการทดสอบทั้งสามวิธีนี้อาจให้ค่าความละเอียดที่แตกต่างกันได้มาก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับกรรมวิธีการทดสอบ โดยผลทดสอบจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นและความพรุนของเถ้าลอยแต่ละอนุภาคเป็นอย่างมาก วิธีการทดสอบพื้นที่ผิวจำเพาะ โดยวิธีของเบลนเป็นการทดสอบที่ทำได้รวดเร็วเพื่อวัดความละเอียดของเถ้าลอย การเพิ่มขึ้นของพื้นที่ผิวซึ่งหาได้จาก วิธีการทดสอบการซึมผ่านได้โดยอากาศในหลายกรณีบ่งชี้ถึงความสามารถในการทำปฏิกิริยาที่สูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งวิธีนี้จะใช้ได้ดีเมื่อใช้เปรียบเทียบเถ้าลอยจากแหล่งเดียวกันซึ่งมีรูปร่างที่เหมือนกัน แต่หากใช้วิธีนี้กับเถ้าลอยที่มีปริมาณคาร์บอนสูงและมีความละเอียดสูง อาจได้ผลที่คาดเคลื่อนได้ ข้อมูลการกระจายขนาดอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าตะแกรงเบอร์ 325 หาได้โดยการใส่คลื่นเสียง (Sonic sifting) และเครื่องทดสอบการกระจายขนาดอนุภาคของเถ้าลอยด้วยแสงเลเซอร์ [6]

### 2.3.3 ความถ่วงจำเพาะ

จากการศึกษาของ Luke พบว่าความถ่วงจำเพาะของเถ้าลอยมีค่าระหว่าง 1.97 ถึง 3.02 แต่โดยทั่วไปค่านี้อยู่ระหว่าง 2.2 – 2.8 สำหรับเถ้าลอยจากแม่เมาะจะมีความถ่วงจำเพาะประมาณ 2.0 แต่เมื่อทำการแยกให้มีขนาดเล็กลงมีความละเอียดสูงขึ้นจะมีความถ่วงจำเพาะเพิ่มขึ้น เพราะเถ้าลอยที่มีขนาดใหญ่มักมีรูพรุนสูงกว่าเถ้าลอยที่มีขนาดเล็ก เถ้าลอยที่มีอนุภาคกลางอาจลอยน้ำได้ เนื่องจากมีความถ่วงจำเพาะของอนุภาคโดยรวมน้อยกว่า 1.0 ความถ่วงจำเพาะที่สูงมักเป็นตัวบ่งชี้ว่าอนุภาคส่วนใหญ่มีความละเอียดสูงและตัน เนื่องจากเถ้าลอยที่อนุภาคหยาบมักมีอนุภาคที่กลวงปนอยู่ค่อนข้างมาก

เถ้าลอยที่ประกอบด้วยแร่เหล็กในปริมาณสูงจะมีความถ่วงจำเพาะสูง ส่วนเถ้าลอยที่มีปริมาณคาร์บอนสูงจะมีความถ่วงจำเพาะต่ำ เถ้าลอย Class C มีแนวโน้มที่จะมีอนุภาคเล็กและมีความละเอียดสูงปนอยู่มากกว่าเถ้าลอย Class F นั่นคือเถ้าลอย Class C จะมีความถ่วงจำเพาะสูงกว่าเถ้าลอย Class F โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 2.4 – 2.8

### 2.4 ปฏิกริยาทางเคมีของเถ้าลอยในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

แคลเซียมซิลิเกตไฮดรตเป็นผลิตภัณฑ์หลักที่เกิดจากการทำปฏิกริยาระหว่างเถ้าลอยกับแอลคาไลและแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในคอนกรีต ซึ่งมีความสำคัญเช่นเดียวกับผลิตภัณฑ์ไฮดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เถ้าลอย Class F เมื่อทำปฏิกริยาแล้วจะมีลักษณะโครงสร้างคล้ายเจลที่มีความหนาแน่นมากกว่าเจลที่เกิดจากปฏิกริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ ปฏิกริยาของเถ้าลอยขึ้นอยู่กับอย่างมากกับการแตกตัวและการละลายของโครงสร้างที่ไม่เป็นผลึกด้วยไฮดรอกไซด์ไอออนและขึ้นอยู่กับความร้อนที่เกิดขึ้นในช่วงแรกของปฏิกริยาไฮดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เถ้าลอยจะทำปฏิกริยาต่อเนื่องกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ซึ่งเป็นผลพลอยได้มาจากปฏิกริยาไฮดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ตลอดช่วงเวลาที่แคลเซียมไฮดรอกไซด์ยังคงเหลืออยู่ในโพรงที่เต็มไปด้วยของเหลวของซีเมนต์เพสต์

เมื่อผสมเถ้าลอยกับน้ำจะเกิดปฏิกริยาทางเคมีน้อยมาก แต่การผสมดังกล่าวจะปล่อยแคลเซียมไฮดรอกไซด์และอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์เข้าสู่สารละลายในช่องว่างของซีเมนต์เพสต์ ปฏิกริยานี้เกิดขึ้นอย่างจำกัด อย่างไรก็ตามหากยังมีแอลคาไลไฮดรอกไซด์ แคลเซียมไฮดรอกไซด์หรือแคลเซียมซิลิเกตอยู่บ้างก็จะเกิดปฏิกริยาได้ทั้งปริมาณความร้อนโดยรวมของปฏิกริยาและอัตราการเพิ่มขึ้นของความร้อนในช่วงต้นจะลดลง เมื่อใช้เถ้าลอยเป็นส่วนหนึ่งของวัสดุประสานในคอนกรีตและเวลาที่เกิดความร้อนขึ้นสูงสุดจะยืคออกไปด้วย ในประเทศไทยพบว่าการใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในงานคอนกรีตสามารถลดความร้อนในคอนกรีตอย่างได้ผลดีด้วยการกำหนดส่วนผสมที่เหมาะสม ซึ่งเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากจะช่วยลดความร้อนในคอนกรีตแล้ว ยังคงได้กำลังอัดสูงตามต้องการด้วย และพบว่าถ้าลอยที่มีองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกัน จะมีผลต่อการพัฒนาความร้อนและกำลังที่แตกต่างกัน อย่างไรก็ตามหากใช้ถ้ำลอยในลักษณะวัสดุผสมเพิ่มเติมในคอนกรีตโดยไม่มีการลดปริมาณปูนซีเมนต์ลงจะทำให้ปริมาณความร้อนโดยรวม และกำลังอัดเพิ่มสูงขึ้น

การทำปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับถ้ำลอยในคอนกรีตจะแบ่งได้เป็น 2 ขั้นตอน ขั้นตอนแรกคือในช่วงการบ่มระยะแรกปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นกับแอลคาไลไฮดรอกไซด์ และในช่วงต่อมาจึงจะเกิดปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทว่าการแบ่งแยกขั้นตอนจะไม่ปรากฏชัดเจนที่อุณหภูมิห้อง เนื่องจากเป็นอุณหภูมิที่แคลเซียมไฮดรอกไซด์เกิดขึ้นน้อยจึงลดการเกิดปฏิกิริยาในช่วงต้นระหว่างแอลคาไลกับถ้ำลอยด้วย ดังเช่นในกรณีศึกษาโดย Verbeck เกี่ยวกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์พบว่า ปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่างถ้ำลอยกับปูนขาวและน้ำเป็นไปตามกฎของ Arrhenius ซึ่งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและอัตราการเกิดปฏิกิริยา โดยอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้อัตราการเพิ่มขึ้นของปฏิกิริยาสูงกว่าอัตราที่ควรเพิ่มตามปกติ

อย่างไรก็ตามพลังงานที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาของถ้ำลอยต่างจากพลังงานที่ใช้ในกรณีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ตามหลักการแล้วความต้องการพลังงานเพื่อใช้ในการทำปฏิกิริยาเคมีประกอบด้วยพลังงานจากสารเคมีที่เข้าทำปฏิกิริยา พลังงานกลจากการบดวัตถุดิบให้ละเอียด และพลังงานความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน หรือจากแหล่งพลังงานความร้อนจากภายนอก ดังนั้นในการคำนวณหาอัตราการพัฒนากำลังของคอนกรีตในช่วงของการบ่มเริ่มแรกต้องใช้พื้นฐานจากการวัดปริมาณความร้อนด้วย Calorimeter เพื่อตรวจหาอัตราการพัฒนาความร้อนที่เกิดจากส่วนผสมต่างๆกันระหว่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับถ้ำลอย

จากความเข้าใจพื้นฐานในการเกิดปฏิกิริยาเคมีของถ้ำลอยทำให้ง่ายต่อการจำแนกปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อการใช้ถ้ำลอยในคอนกรีตอย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งปัจจัยดังกล่าวได้แก่

- องค์ประกอบทางเคมีความเป็นผลึกหรือไม่เป็นผลึกของถ้ำลอยและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์
- ความเข้มข้นของแอลคาไลไฮดรอกไซด์ในระบบปฏิกิริยา
- ลักษณะโครงสร้างของอนุภาคถ้ำลอย
- ความละเอียดของถ้ำลอยและของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์
- การพัฒนาความร้อนในช่วงแรกของการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน
- การลดลงของปริมาณน้ำที่ต้องการสำหรับการผสมคอนกรีตเมื่อมีการใช้ถ้ำลอยในส่วนผสม

ความแปรปรวนขององค์ประกอบทางเคมีและความพร้อมในการทำปฏิกิริยาทางเคมีของถ้ำลอยจะส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติและพฤติกรรมของคอนกรีตในช่วงอายุต้นๆ ดังนั้นการทำนายคุณสมบัติของคอนกรีตโดยอาศัยคุณสมบัติของถ้ำลอยเพียงอย่างเดียวยังทำได้ยาก โดยทั่วไปจึงมักต้องอาศัยการทดลองผสมจริงเพื่อบ่งชี้ถึงความสามารถในการเท คุณสมบัติทางด้านกำลังและความทนทานของคอนกรีตที่ผสมถ้ำลอย [6]

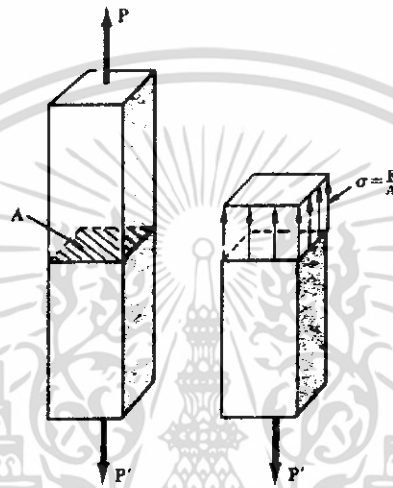
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.5 แรงตามแนวแกน และความเค้นในแนวตั้งฉาก

แรงต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ หรือความเข้มของแรงที่กระจายบนหน้าตัด เรียกว่า ความเค้น (Stress) บนหน้าตัดนั้นๆ และแทนด้วยอักษรกรีก  $\sigma$  (ซิกมา) ดังนั้นความเค้นบนชิ้นส่วนที่มีขนาดพื้นที่หน้าตัด  $A$  และรับแรงตามแนว  $P$  (รูปที่ 2.1) จะได้จากผลหารระหว่างแรง  $P$  กับ พื้นที่หน้าตัด  $A$  นั่นคือ

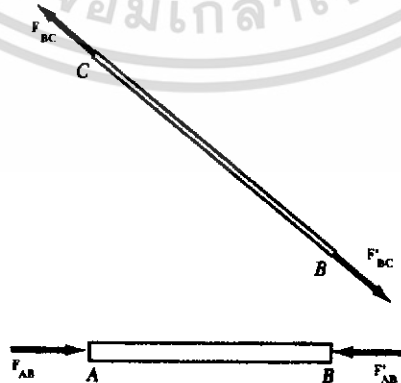
$$\sigma = P/A$$

2.1



รูปที่ 2.1 ความเค้นในแนวตั้งฉาก

เครื่องหมายบวกจะใช้เพื่อแสดงว่าเป็นความเค้นดึง(ชิ้นส่วนรับแรงดึง) และเครื่องหมายลบจะใช้เพื่อแสดงว่าเป็นความเค้นอัด(ชิ้นส่วนรับแรงอัด) เนื่องจากในที่นี้เราจะใช้หน่วยระบบเอสไอ (SI Metric units) ดังนั้นแรง  $P$  จึงมีหน่วยเป็นนิวตัน (N) พื้นที่  $A$  มีหน่วยเป็นตารางเมตร ( $m^2$ ) และความเค้น  $\sigma$  มีหน่วยเป็นนิวตันต่อตารางเมตร ( $N/m^2$ ) หรือว่าปาสกาล (Pa)



รูปที่ 2.2 แรงตามแนวแกน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังที่เราได้เห็นแล้วว่าชิ้นส่วน BC ในหัวข้อที่ผ่านมาเป็นชิ้นส่วนที่รับแรง 2 แรง ดังนั้นแรง  $F_{BC}$  และแรง  $F'_{BC}$  ซึ่งกระทำที่ปลาย B และ C (ดังรูปที่ 2.2)

จึงมีทิศทางเดียวกับแนวแกนของชิ้นส่วน อาจกล่าวได้ว่าชิ้นส่วนนี้อยู่ภายใต้ **แรงตามแนวแกน (Axial loading)** หน้าตัดที่ตัดผ่านชิ้นส่วนเพื่อที่จะหาขนาดของแรงภายในและค่าความเค้นที่เกิดขึ้นนั้นจะตั้งฉากกับแนวแกนของชิ้นส่วน ดังนั้นทิศทางของแรงภายในจะตั้งฉากกับระนาบของหน้าตัด และความเค้นที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า **ความเค้นในแนวตั้งฉาก (Normal stress)** สมการที่ 2.1 แสดงค่าความเค้นในแนวตั้งฉากในชิ้นส่วนที่รับแรงตามแนวแกน

ในสมการที่ (2.1)  $\sigma$  จะได้จากการหารค่าของ  $P$  ซึ่งเป็นค่าผลลัพธ์ของแรงภายในซึ่งกระจายอยู่บนหน้าตัดด้วย  $A$  ซึ่งเป็นพื้นที่หน้าตัด ดังนั้นจึงเป็นค่าเฉลี่ยของความเค้นบนหน้าตัดนี้ แต่ไม่ใช่ค่าความเค้นที่จุดใดจุดหนึ่งบนหน้าตัด

ในการหาค่าความเค้นที่จุด  $Q$  บนหน้าตัด เราจะต้องพิจารณาพื้นที่เล็กๆ  $\Delta A$  (รูปที่ 2.3) เมื่อหารค่าของ  $\Delta F$  ด้วย  $\Delta A$  เราจะได้ค่าเฉลี่ยของความเค้นบนพื้นที่  $\Delta A$  ให้  $\Delta A$  เข้าสู่ศูนย์จะได้ค่าความเค้นที่จุด  $Q$  คือ

$$\sigma = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \Delta F / \Delta A \quad 2.2$$



รูปที่ 2.3 ความเค้นบนพื้นที่  $\Delta A$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยทั่วไปค่าของความเค้น  $\sigma$  ที่จุด Q บนหน้าตัดจะมีค่าแตกต่างจากค่าเฉลี่ยที่ได้จากสมการที่ 2.1 และจะพบว่าค่าของ  $\sigma$  จะแตกต่างกันไปสำหรับแต่ละจุดบนหน้าตัด ในแท่งวัสดุเปรี๊ยะซึ่งรับแรงกระทำเป็นจุด P และ P' ซึ่งมีขนาดเท่ากันและทิศทางตรงกันข้าม (รูปที่ 2.4a) ความแปรผันของความเค้นบนหน้าตัดจะมีค่าน้อยบนหน้าตัดที่อยู่ห่างออกไปจากจุดที่มีแรงมากระทำ (รูปที่ 2.4 c) แต่ความแปรผันจะเห็นได้ชัดเจนบริเวณใกล้เคียงกับที่มีแรงมากระทำ (รูปที่ 2.4 b และ d)



รูปที่ 2.4 แรงกระทำบนหน้าตัดในแท่งวัสดุเปรี๊ยะ

จากสมการที่ (2.2) จะได้ว่าขนาดผลลัพท์ของแรงภายในที่กระจายอยู่บนหน้าตัดมีค่าเท่ากับ

$$\int dF = \int A \sigma dA \quad 2.3$$

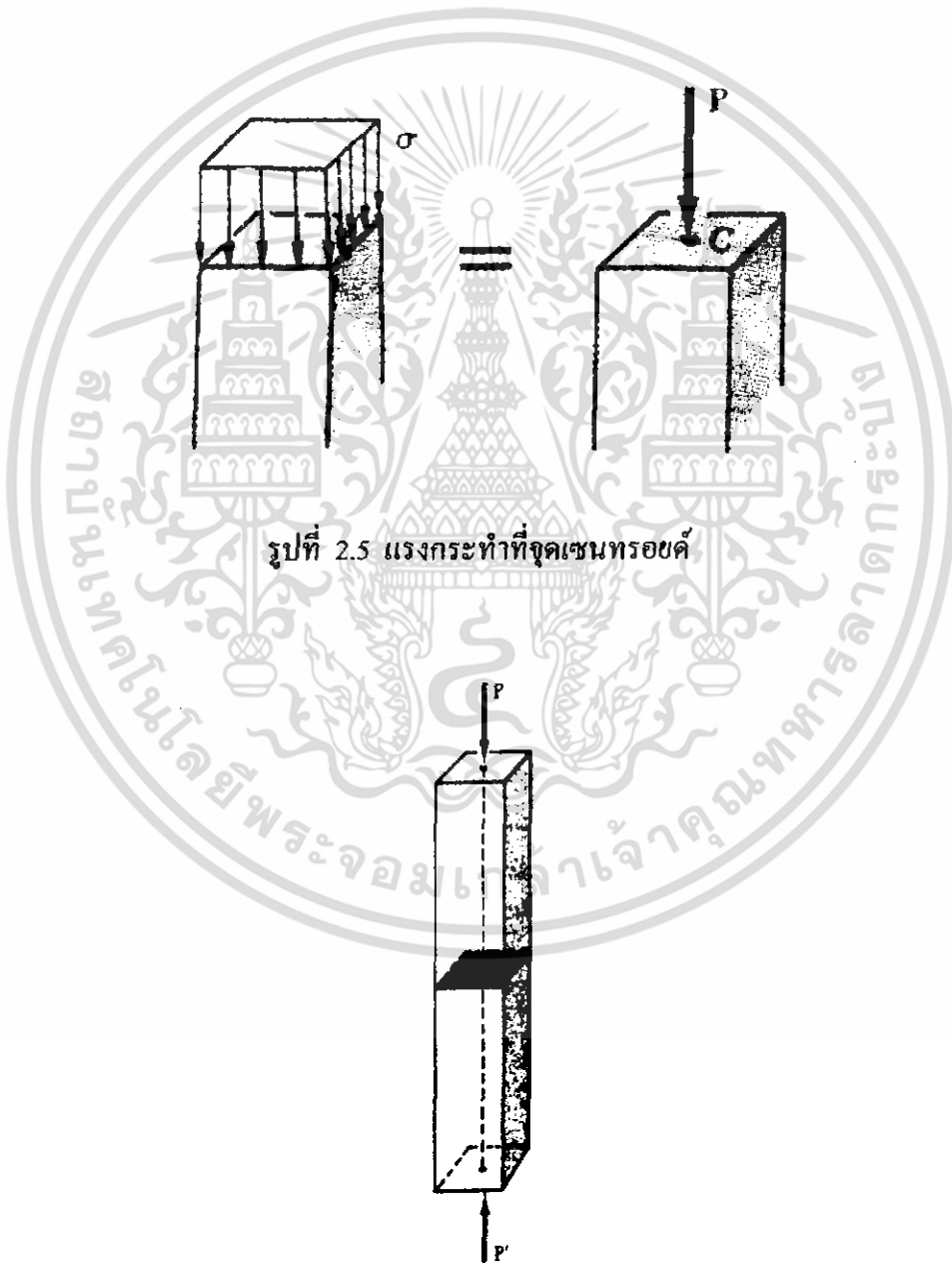
แต่จากสภาพสมดุลในแต่ละช่วงของแท่งวัสดุในรูปที่ 1.8 จะได้ว่าค่านี้จะต้องเท่ากับขนาดของแรง P ดังนั้น

$$P = \int dF = \int A \sigma dA \quad 2.4$$

ซึ่งหมายความว่าปริมาตรภายใต้พื้นที่ผิวที่รับความเค้นแต่ละพื้นที่ผิวในรูปที่ 2.4 นั้นจะต้องเท่ากับขนาดของแรง P อย่างไรก็ตามนี้เป็นเพียงสิ่งเดียวที่เราสามารถพิสูจน์ได้จากความรู้ทางสถิติศาสตร์ในเรื่องการกระจายของความเค้นในแนวตั้งจากบนหน้าตัดต่างๆในแท่งวัสดุการกระจายที่แท้จริงของความเค้นบนหน้าตัดเป็นสิ่งที่ไม่สามารถหาได้ และในการที่จะศึกษาการกระจายของความเค้นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้มากกว่านี้ เราต้องการพิจารณาการเสียรูปที่เกิดจากแรงที่มากระทำที่ปลายของชิ้นส่วนในแต่ลักษณะ

ในทางปฏิบัติ เราตั้งสมมติฐานว่าความเค้นในแนวตั้งฉากกระจายสม่ำเสมอในชิ้นส่วนที่รับแรงตามแนวแกน ยกเว้นตรงบริเวณที่ชิดกับจุดที่มีแรงมากระทำ ดังนั้นค่า  $\sigma$  หรือความเค้นจะมีค่าเท่ากับ  $\sigma_{ave}$  และหาค่าได้จากสมการที่ 1.1 อย่างไรก็ตามเมื่อเราสมมติว่าแรงภายในกระจายอย่างสม่ำเสมอบนหน้าตัดแล้ว จากสถิติศาสตร์เบื้องต้นจะได้ว่าแรงภายในลัพท์  $P$  จะต้องกระทำที่จุดเซนทรอยด์  $C$  ของหน้าตัด (รูปที่ 2.5) ซึ่งหมายความว่า การกระจายอย่างสม่ำเสมอของความเค้นจะเป็นไปได้ต่อเมื่อแนวของแรง  $P$  และ  $P'$  ผ่านจุดเซนทรอยด์ ของหน้าตัดที่พิจารณา



รูปที่ 2.5 แรงกระทำที่จุดเซนทรอยด์

รูปที่ 2.6 แรงตรงศูนย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.6 แรงในลักษณะนี้เรียกว่า **แรงตรงศูนย์** (Centric loading) และถือว่าจะเกิดขึ้นกับทุกชิ้นส่วนที่รับแรง 2 แรงซึ่งมีแนวแกนเป็นเส้นตรง [7]

## 2.6 การนำความร้อน (Conduction)

การนำความร้อนเป็นวิธีการที่ความร้อนเคลื่อนที่จากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำภายใต้ตัวกลางเดียวกันหรือระหว่างตัวกลางต่างชนิดที่อยู่ติดกัน ซึ่งการถ่ายโอนความร้อนเกิดจากผลของการเคลื่อนที่ของ โมเลกุลภายในตัวกลาง

สมการที่ใช้คำนวณหาปริมาณการนำความร้อนถูกเสนอขึ้นในปี ค.ศ. 1822 โดยนักวิทยาศาสตร์ชาวฝรั่งเศสชื่อ โจเซฟ ฟูเรียร์ (Joseph Fourier) โดยรูปของสมการเป็นดังนี้

$$Q = -kA \frac{dT}{dx} \quad 2.5$$

Q = อัตราการนำความร้อน (W)

k = ค่าการนำความร้อน (thermal conductivity, W/m K)

A = พื้นที่ในการถ่ายโอนความร้อน (m<sup>2</sup>)

T = อุณหภูมิ

x = ระยะทางในการเคลื่อนที่ของความร้อน

เนื่องจากความร้อนจะเกิดการถ่ายโอนจากจุดที่มีอุณหภูมิสูงไปยังจุดที่มีอุณหภูมิต่ำ ซึ่งจะทำให้  $\frac{dT}{dx}$  มีเครื่องหมายเป็นลบ ดังนั้นเพื่อให้อัตราการนำความร้อนในทิศทาง x มีค่าเป็นบวกจึงมีการเติมเครื่องหมายลบไว้ด้านขวามือของสมการการนำความร้อน สำหรับค่าการนำความร้อนเป็นค่าเฉพาะตัวของวัสดุแต่ละชนิด [5] โดยมีตัวอย่างของค่าการนำความร้อนวัสดุบางชนิดแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ค่าการนำความร้อนของวัสดุบางชนิดที่อุณหภูมิห้อง

วัสดุ	ค่าการนำความร้อน (W/m K)
เหล็ก	80.2
ปรอท (ของเหลว)	8.54
แก้ว	1.4
อิฐ	0.72
น้ำ (ของเหลว)	0.613
อากาศ (แก๊ส)	0.026

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ ในเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ดูแลเห็นใบใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.7 การพาความร้อน (Convection)

การพาความร้อนเป็นการถ่ายโอนความร้อนระหว่างผิวของของแข็งกับของไหลที่มีการเคลื่อนที่ ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าการพาความร้อนเกิดขึ้นจากผลของการนำความร้อนรวมกับการเคลื่อนที่ของของไหล การพาความร้อนแบ่งออกได้ 2 ลักษณะคือ

- การพาความร้อนแบบบังคับ (Forced convection) เกิดขึ้นเมื่อมีแรงภายนอกมาบังคับให้ของไหลเคลื่อนที่ผ่านผิววัตถุที่ร้อนกว่าหรือเย็นกว่า

- การพาความร้อนแบบอิสระ (Free convection) เกิดขึ้นเมื่อของไหลเกิดการเคลื่อนที่เนื่องจากแรงลอยตัว (Buoyancy force) ของของไหลและแรงลอยตัวนี้เกิดจากความแตกต่างของความหนาแน่นของของไหล อันเป็นผลจากความแตกต่างของอุณหภูมิในชั้นของของไหล

สมการสำหรับหาอัตราการพาความร้อนอยู่ในรูปกฎการเย็นตัวของนิวตัน (Newton's law of cooling) เป็นดังนี้

$$Q = hA(T_s - T_f)$$

2.6

$h$  = สัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิวสัมผัสระหว่างของไหลกับวัตถุ ( $W/m^2 K$ )

$A$  = พื้นที่ผิวของวัตถุที่สัมผัสกับของไหล ( $m^2$ )

$T_s$  = อุณหภูมิของผิววัตถุ (K)

$T_f$  = อุณหภูมิของของไหลที่อยู่ห่างออกไปจากผิวหรืออุณหภูมิมวลส่วนของไหล (K)

สำหรับสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเป็นสมบัติที่ได้จากการทดลอง ปัจจัยที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนมีหลายอย่าง เช่น รูปร่างของวัตถุ ลักษณะการไหลของของไหล และสมบัติของของไหล เป็นต้น [5]

## 2.8 การแผ่รังสีความร้อน (Radiation)

การแผ่รังสีความร้อนเป็นการถ่ายโอนความร้อนโดยไม่ต้องอาศัยตัวกลาง ความร้อนจากการแผ่รังสีจะเคลื่อนที่ไปในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic wave) การแผ่รังสีความร้อนจะเกิดได้ดีในบริเวณที่เป็นสุญญากาศ

อัตราการแผ่รังสีความร้อนจากผิวของวัตถุที่มีอุณหภูมิสัมบูรณ์เท่ากับ  $T_s$  เป็นไปตามกฎของสเตฟาน-โบลทซ์มันน์ (Stefan – Boltzmann) ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงแก้ไข 62382

$$Q = \sigma AT^4, \quad 2.7$$

$\sigma$  = ค่าคงสตีฟาน-โบลทซ์มันน์ (Stefan – Boltzmann constant) มีค่าเท่ากับ  $5.67 \cdot 10^{-8}$  W/(m<sup>2</sup>K<sup>4</sup>)

A = พื้นที่ผิวของวัตถุที่แผ่รังสีความร้อน (m<sup>2</sup>)

T<sub>s</sub> = อุณหภูมิสัมบูรณ์ของวัตถุแผ่รังสีความร้อน (K)

พื้นที่ผิวของวัตถุอุดมคติ (Idealized surface) ที่สามารถแผ่รังสีได้สูงสุดซึ่งเป็นไปตามสมการการแผ่รังสีความร้อนเรียกว่า วัตถุดำ (Blackbody) สำหรับวัตถุที่มีอยู่ทั่วไปจะแผ่รังสีได้น้อยกว่าวัตถุอุดมคติ โดยมีอัตราการแผ่รังสีความร้อนเป็นไปตามสมการดังนี้

$$Q = \epsilon \sigma AT^4, \quad 2.8$$

เมื่อ  $\epsilon$  = ค่าการแผ่รังสี (Emissivity) ซึ่งเป็นปริมาณที่แสดงถึงประสิทธิภาพการแผ่รังสีความร้อนของวัตถุเมื่อเปรียบเทียบกับวัตถุที่สามารถแผ่รังสีความร้อนได้สูงสุด (วัตถุอุดมคติ),  $0 \leq \epsilon \leq 1$  [4]

เมื่อพิจารณาการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างวัตถุใดๆ ที่มีพื้นที่ผิว A และมีค่าการแผ่รังสีเท่ากับ  $\epsilon$  กับวัตถุที่ครอบคลุม (Enclosure) วัตถุที่แผ่รังสีอยู่เมื่อวัตถุที่แผ่รังสีมีอุณหภูมิ T<sub>s</sub> และวัตถุที่ครอบคลุมนี้อุณหภูมิ T<sub>sur</sub> เราสามารถเขียนสมการแลกเปลี่ยนความร้อนสุทธิของวัตถุทั้งสองได้ดังนี้

$$Q = \epsilon \sigma A (T_s^4 - T_{sur}^4) \quad 2.9$$

## 2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสานและขนาดของถ้ำลอยกับกำลังอัดของคอนกรีตกำลังสูงผสมถ้ำลอยแม่เมาะ สำหรับใช้ในการออกแบบส่วนผสมตามวิธีการของ ACI และเพื่อศึกษาความต้องการน้ำของส่วนผสมที่เปลี่ยนแปลงเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ในส่วนผสมถ้ำลอยแม่เมาะแบบคักและไม่คักแยกขนาด การศึกษาทำได้โดยทดสอบชุดตัวอย่างที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสานยังแบ่งออกเป็นส่วนผสมที่ยังไม่ผสมถ้ำลอย (คอนกรีตควบคุม) และส่วนผสมแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยถ้ำลอยซึ่งแบ่งเป็นแบบคักและไม่คักแยกขนาดร้อยละ 15, 25 และ 35 โดยน้ำหนักของวัสดุเชื่อมประสาน โดยควบคุมค่าการยุบตัวของคอนกรีตสดอยู่ระหว่าง 5-8 ซม. ด้วยการทดสอบความสามารถเทได้ และทำการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตผสมถ้ำลอยแม่เมาะที่อายุ 1, 7, 28 และ 56 วัน ผลการวิจัยพบว่าความต้องการน้ำของคอนกรีตสดที่ผสมเอ็กสตรีนเป็นเอ็กสตรีนที่ส่งมอบในเวลาสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้ำลอมแม่เมาะในปริมาณร้อยละที่เท่ากัน ถ้ำลอมแบบคัดแยกขนาดจะลดความต้องการน้ำได้มากกว่า ถ้ำลอมแบบไม่คัดแยกขนาด และความต้องการน้ำจะลดลงตามปริมาณการแทนที่ด้วยถ้ำลอมที่เพิ่มขึ้น และเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสานเพิ่มขึ้นจะทำให้ความต้องการน้ำลดลงด้วย สำหรับคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วการทดสอบกำลังอัดของส่วนผสมที่แทนที่ด้วยถ้ำลอมแม่เมาะแบบคัดและไม่คัดแยกขนาดร้อยละ 15 ,25 และ 35 สำหรับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสานระหว่าง 0.35-0.44 ให้ผลการทดสอบกำลังอัดเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ไม่ผสมถ้ำลอม พบว่าคอนกรีตที่ผสมด้วยถ้ำลอมแบบคัดแยกขนาดร้อยละ 15 -35 จะให้กำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตควบคุมที่อายุตั้งแต่ 7 วัน และคอนกรีตที่ผสมด้วยถ้ำลอมแบบไม่คัดแยกขนาดร้อยละ 25 และ 35 จะให้กำลังอัดใกล้เคียงหรือสูงกว่าคอนกรีตควบคุมที่อายุตั้งแต่ 28 วัน และนอกจากนี้ยังพบว่าคอนกรีตที่ผสมถ้ำลอมแบบคัดแยกขนาดมีการพัฒนากำลังอัดดีกว่าคอนกรีตที่ผสมถ้ำลอมแบบไม่คัดแยกขนาดที่ทุกอายุ จากผลการวิจัยสามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสานสำหรับการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตกำลังสูงผสมถ้ำลอมแม่เมาะด้วยวิธีการของเอซีไอ และใช้ทำนายกำลังอัดของคอนกรีตผสมถ้ำลอมแม่เมาะที่ร้อยละของการแทนที่เท่ากับ 15 ,25 และ35 ที่อายุ 1 ,7,28 และ 56 วัน [1]

งานวิจัยที่พบได้ทำให้ถ้ำลอมจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จ. ลำปาง ที่เกิดขึ้นปีละประมาณ 3 ล้านตันและเคยเป็นปัญหาในเรื่องของสถานที่จัดเก็บ รวมถึงมลภาวะกลายเป็นมูลค่านับพันล้านบาทต่อปีแก่บริษัทปูนซีเมนต์ต่างๆของไทย ถ้ำลอมที่เกิดจากโรงไฟฟ้านอกจากนำมาใช้ในการก่อสร้างแล้วยังช่วยอนุรักษ์ทรัพยากรธรรมชาติ กล่าวคือ นำไปสู่การลดการทำลายภูเขาหินปูนเพื่อนำมาทำปูนซีเมนต์ โดยในปี2545 ถ้ำลอมถูกนำไปใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ในอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์และคอนกรีตสูงถึง 1.8 ล้านตันซึ่งราคาถ้ำลอมในท้องตลาดมีมูลค่าประมาณ 900-1,000 บาท ต่อตัน ดังนั้นคิดเป็นมูลค่าประมาณ 1,800 ล้านบาท “ งานวิจัยนี้ใช้งบประมาณไปทั้งสิ้น 15-20 ล้านบาท แต่สามารถนำผลตอบแทนกลับมาสู่ภาคอุตสาหกรรมไทยได้นับล้านบาท ดังนั้น ถือเป็นตัวอย่างผลงานการวิจัยที่สามารถสร้างมูลค่า และเพิ่มศักยภาพการแข่งขันอุตสาหกรรมไทยได้เป็นอย่างดี ” ดร. เมธิ กล่าวก่อนหน้าการวิจัยเพื่อนำถ้ำลอมมาใช้ประโยชน์มีกลุ่มนักวิชาการรวมตัวกันทำการวิจัยมาตั้งแต่ปี 2536 แต่ยังมีน้อยคนจนในปี 2542 มีจำนวนคนมาร่วมวิจัยมากขึ้น มีการแลกเปลี่ยนความรู้ซึ่งกันและกัน และต่อขอคงานวิจัยซึ่งกันและกันจนทำให้แน่ชัดว่า สามารถนำถ้ำลอมมาสู่การใช้งานได้จริงและช่วยคุณภาพของถ้ำลอมลิกไนต์แม่เมาะในปัจจุบันสามารถนำทุกส่วนของถ้ำลอมที่ผลิตได้มาผสมกับซีเมนต์ได้โดยตรงในงานคอนกรีตผสมเสร็จ สำหรับการนำคอนกรีตผสมถ้ำลอมไปใช้ในงานคอนกรีตต่างๆ นอกจากการแทนที่ปูนซีเมนต์ในงานคอนกรีตปกติในอัตราไม่เกิน 20 % จะไม่ทำให้คุณสมบัติของคอนกรีตเปลี่ยนแปลงไปจะ ไม่สามารถผลิตคอนกรีตเพื่องานชนิดนั้นๆ ได้ เช่น งานสร้างเขื่อนที่มีการเทคอนกรีตเป็นชั้นๆซ้อนทับกันขึ้นไปเรื่อยๆ จากพื้นล่างขึ้นสู่ชั้นบนอย่างต่อเนื่อง (Roller ไปแล้วยังมีการนำไปใช้ในงานพิเศษที่ถ้าไม่ใช้ถ้ำลอมผสมเข้าไปด้วยแล้ว Compacted เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

concrete) เทคโนโลยีนี้ใช้กับการสร้างเขื่อนปากมูล โครงการสร้างเขื่อนแม่สวย และเขื่อนท่าคัน จ. นครนายก เทคโนโลยีการผสมคอนกรีตโดยใช้เถ้าลอยเป็นส่วนผสมนี้สามารถลดต้นทุนทั้งวัสดุ แรงงาน เวลา การซ่อมบำรุงและช่วยประหยัดงบประมาณการก่อสร้างมากกว่าวิธีแบบเก่าได้อย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งการใช้งานกับคอนกรีตกำลังสูง เช่น การสร้างผนังสูงกันไฟของโรงไฟฟ้า จ. ราชบุรี ทางโค้งกลับรถของโครงการทางด่วน ปากเกร็ด-บางปะอิน จุดเชื่อมกำแพงคอนกรีตเสริม เหล็กกับพื้นของอาคารทดสอบเครื่องยนตบริษัท การบินไทย จำกัด สำหรับงานก่อสร้างปัจจุบันที่ใช้ เถ้าลอยเป็นส่วนผสมแทนที่ปูนซีเมนต์ ได้แก่ การเทฐานรากสถานีรถไฟ บีทีเอส (BTS) หนา ประมาณ 5 เมตร ฐานรากโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อน จ. ราชบุรี เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีการใช้งาน คอนกรีตผสมเถ้าลอยในสภาพงาน 1) เททำเทียบเรือและฐานรากในน้ำทะเลของท่าเทียบเรือน้ำลึก จ. ระยอง 2) ฐานรากโรงไฟฟ้า จ. ระยอง 3) อาคารบำบัดน้ำเสีย จ. ระยอง เป็นต้น [2]

งานวิจัยนี้เป็นการนำเอาเถ้าแกลบไม่บดมาประยุกต์ใช้ในการผลิตคอนกรีตบล็อกกลวงชนิดไม่ รับน้ำหนักบรรทุกคุณสมบัติที่ทำการทดสอบประกอบด้วย หน่วยน้ำหนัก การดูดซึมน้ำ กำลังอัด การ หดตัวแบบแห้ง ความคงทนต่อสภาพเปียกสลับแห้ง โดยใช้เถ้าแกลบจาก 2 แหล่งคือ เถ้าแกลบค่าจาก โรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าที่ใช้เถ้าเป็นเชื้อเพลิง และเถ้าแกลบค่าจาก โรงสีข้าวมาแทนที่ในมวลรวม (หินฝุ่น) ในอัตราส่วนร้อยละ 0 10 15 และ 20 โดยน้ำหนัก และควบคุมอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ ในช่วงร้อยละ 0.53 ถึง 0.64 โดยน้ำหนัก โดยใช้การขึ้นรูปได้ของคอนกรีตบล็อกเป็นเกณฑ์ จากการ ทดสอบพบว่ากำลังอัดของคอนกรีตบล็อกผสมเถ้าแกลบมีค่าเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของการแทนที่ของ ซีเถ้าแกลบในหินฝุ่นที่เพิ่มขึ้น และมีค่าสูงกว่าเกณฑ์ขั้นต่ำที่กำหนดไว้ตามมาตรฐาน มอก. 58-2530 ในขณะที่หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตบล็อกผสมเถ้าแกลบมีค่าลดลง นอกจากนั้นเมื่อร้อยละของการ แทนที่ของเถ้าแกลบในหินฝุ่นมากขึ้น ทำให้ความคงทนต่อการกัดกร่อนของกรด ค่าการดูดซึมน้ำ และการหดตัวแบบแห้ง มีค่าเพิ่มขึ้นด้วย [3]

ในปี พ.ศ. 2530 ปรีชญู จินดาประเสริฐ และ อินทรชัย หอวิจิตร [4] ได้ทำการวิจัยเพื่อศึกษา คุณสมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ซีเถ้าแกลบ และซีเถ้าลอยการทดสอบใช้ปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่ง ซีเถ้าแกลบเทาขาว ซีเถ้าแกลบดำ และซีเถ้าลอยแม่เมาะวิธีการผสมใช้ 2 แบบ คือการผสมธรรมดา (Blending) และการบดรวม (Intergrinding) คุณสมบัติของปูนซีเมนต์ผสม ที่ศึกษาได้แก่ ระยะเวลาการก่อตัวความชื้นเหลวปกติ การคายน้ำ กำลังอัด การขยายตัวเมื่อเปียก การ หดตัวเมื่อแห้ง และความทนทานต่อสภาพกรด จากการทดสอบพบว่า คุณสมบัติของปูนซีเมนต์ผสม ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนผสมซีเถ้าแกลบที่มีความละเอียดมากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และซีเถ้าลอย ส่วนผสมที่มีซีเถ้าแกลบมากจะมีความต้องการน้ำสูงขึ้น ส่วนผสมที่มีซีเถ้าแกลบและซีเถ้าลอยอยู่มาก จะมีระยะเวลาการก่อตัวมากขึ้น การคายน้ำลดลง การขยายตัวเมื่อเปียก และการหดตัวเมื่อแห้ง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพิ่มขึ้น ส่วนผสมที่มีปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์อยู่ร้อยละ 20-40 โดยน้ำหนักของมวลทั้งหมดจะให้ความต้านทานต่อการกัดกร่อนของกรดดีที่สุด นอกจากนี้ยังพบว่า การแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยซีเมนต์แกลบและซีเมนต์ลอยทำให้กำลังดึงของแท่งมอร์ตาร์ดี้ขึ้น

## 2.10 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมชิ้นส่วนคอนกรีตมวลเบา แบบมีฟองอากาศ- ออบไอน้ำ

### 2.10.1 ชั้นคุณภาพและชนิด

คอนกรีตมวลเบาแบ่งตามความต้านแรงอัดออกเป็น 4 ชั้นคุณภาพ และแบ่งตามความหนาแน่นเชิงปริมาตรออกเป็น 7 ชนิด โดยชั้นคุณภาพและชนิดของคอนกรีตมวลเบา มีความสัมพันธ์กันตามตารางที่ 4 [8]

ตารางที่ 4 ชั้นคุณภาพและชนิดของคอนกรีตมวลเบา

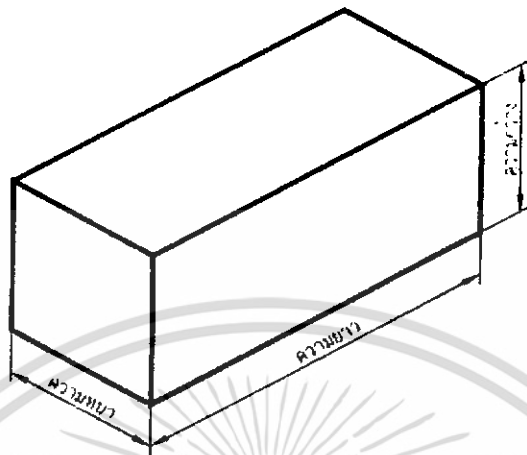
ชั้นคุณภาพ	ความต้านแรงอัด กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร		ชนิด	ความหนาแน่นเชิงปริมาตร เฉลี่ย กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
	ค่าเฉลี่ย	ค่าต่ำสุด		
2	25.48	20.39	0.4	310 - 400
			0.5	410 - 500
4	50.97	40.77	0.6	510 - 600
			0.7	610 - 700
			0.8	710 - 800
6	76.45	61.16	0.7	610 - 700
			0.8	710 - 800
8	101.94	81.55	0.8	710 - 800
			0.9	810 - 900
			1.0	910 - 1000

## 2.11 ขนาดและเกณฑ์ความคลาดเคลื่อน

2.1.1 ขนาดและเกณฑ์ความคลาดเคลื่อน ขนาดของคอนกรีตมวลเบาที่กำหนดไว้ตามมาตรฐานนี้ ออกแบบเพื่อให้เป็นไปตามระบบการประสานทางพิคัดในงานก่อสร้างอาคาร ซึ่งได้กำหนดหน่วยพิคัดมูลฐาน ให้เท่ากับ 100 มิลลิเมตร ขนาดของคอนกรีตมวลเบาให้เป็นไปตามตารางที่ 5 โดยมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนได้ไม่เกิน  $\pm 2$  มิลลิเมตร ในกรณีมีร่องและลิ้น ให้เพิ่มได้อีกมิลละ 9 มิลลิเมตรดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ขนาดของคอนกรีตมวลเบา

ตารางที่ 5 ขนาดของคอนกรีตมวลเบา (หน่วยเป็นมิลลิเมตร)

ความกว้าง	ความยาว	ความหนา
200	600	75
300		90
400		100
		125
		150
		175
		200
		250

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### ขั้นตอนการดำเนินงาน

#### 3.1 การเตรียมวัสดุและอุปกรณ์

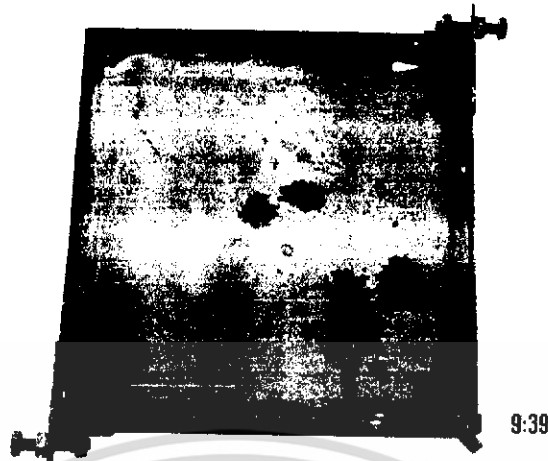
3.1.1 บล็อกหล่อลูกปูน (Mold) ลักษณะเป็นทรงกระบอกมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 ซม. ความสูง 30 ซม. ดังรูปที่ 3.1 ซึ่งสามารถถอด-ประกอบโดยการขันน็อต ใช้สำหรับหล่อส่วนผสมที่จะผลิตอิฐมวลเบาที่ผสมเถ้าลอยถ่านหินและเถ้าลอยแกลบ และนำไปทดสอบค่าความแข็งแรง (Concrete compressive strength test) โดยจะทำตัวอย่างทดสอบค่าความแข็งแรงจำนวน 3 Mold ต่อ 1 สูตร ซึ่งจะได้ความอนุเคราะห์จาก ภาควิชากรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



รูปที่ 3.1 บล็อกหล่อลูกปูน

3.1.2 แบบหล่อแผ่นทดสอบความร้อน ลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด กว้าง 30 ซม. ยาว 30 ซม. หนา 2.5 ซม. ดังรูปที่ 3.2 สามารถถอด-ประกอบได้เช่นกัน โดยการขันน็อต ใช้สำหรับหล่อส่วนผสมที่จะผลิตอิฐมวลเบาที่ผสมเถ้าลอยถ่านหินและเถ้าลอยแกลบ แบบเป็นลักษณะแผ่นสี่เหลี่ยม เพื่อนำไปทดสอบค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity) โดยจะทำตัวอย่างทดสอบค่าการนำความร้อนจำนวน 2 แผ่นต่อ 1 สูตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



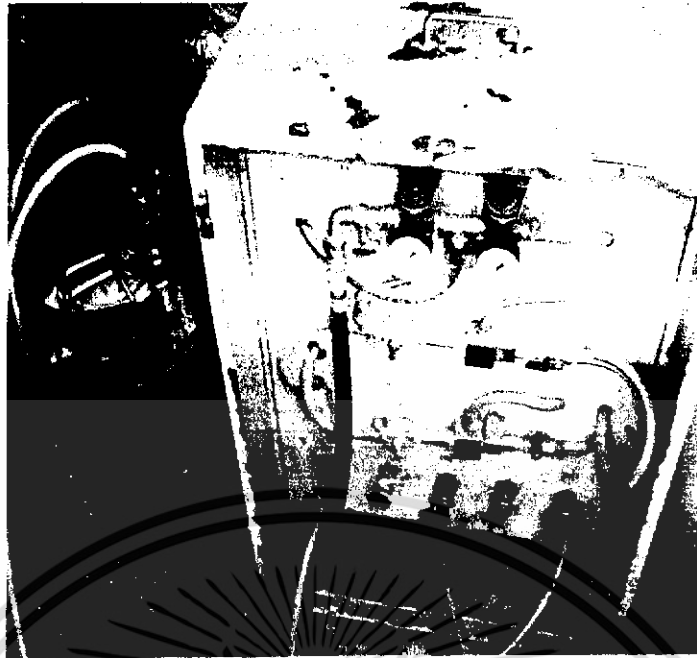
รูปที่ 3.2 แบบหล่อแผ่นทดสอบความร่อน

3.1.3 เครื่องทดสอบความแข็งแรง ขนาดแรงกดของเครื่องทดสอบมีขนาด 2000 kn ใช้สำหรับทดสอบความแข็งแรงของลูกปูน (Compressive strength) ดังรูปที่ 3.3 โดยจะแสดงผลเป็นลักษณะตัวเลข



รูปที่ 3.3 เครื่องทดสอบความแข็งแรง

3.1.4 เครื่องฉีดสารเคมี จะใช้สำหรับฉีดสารเคมีซึ่งมีลักษณะคล้ายโฟม เพื่อเป็นส่วนผสมหนึ่งของการผลิตอิฐมวลเบา ซึ่งจะใช้แรงดันในระบบของเครื่องฉีดสารเคมี 5.5-7 Bar ดังรูปที่ 3.4 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 เครื่องฉีดสารเคมี

3.1.5 เครื่องผสมปูน (Mixer) ซึ่งเป็นเครื่องผสมปูนขนาดเล็กสามารถทำการเคลื่อนย้ายได้โดยใช้ล้อ ใช้สำหรับผสมส่วนผสมแต่ละสูตรในการทดลองให้เข้า ใช้มอเตอร์ขนาด 3 kw ดังรูปที่ 3.5

3.1.6 โฟมอินทรีย์ (Foam) ลักษณะการนำไปใช้นั้นจะต้องนำไปผสมกับน้ำสะอาดก่อน ในปริมาณที่ผู้ผลิตได้กำหนดไว้ โดยจะนำไปผสมกับน้ำในถังความดัน หลังจากนั้นจะทำการอัดลมเพื่อให้เกิดความดันดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.5 เครื่องผสมปูน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 โฟมอินทรีย์

### 3.2 การจัดเตรียมส่วนผสมผลิตอิฐมวลเบา

ส่วนผสมที่ใช้ในการทดลอง มีดังนี้

3.2.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

3.2.2 ทรายละเอียด

3.2.3 เถ้าลอย

3.2.4 โฟมอินทรีย์

3.2.5 น้ำที่ใช้ผสม

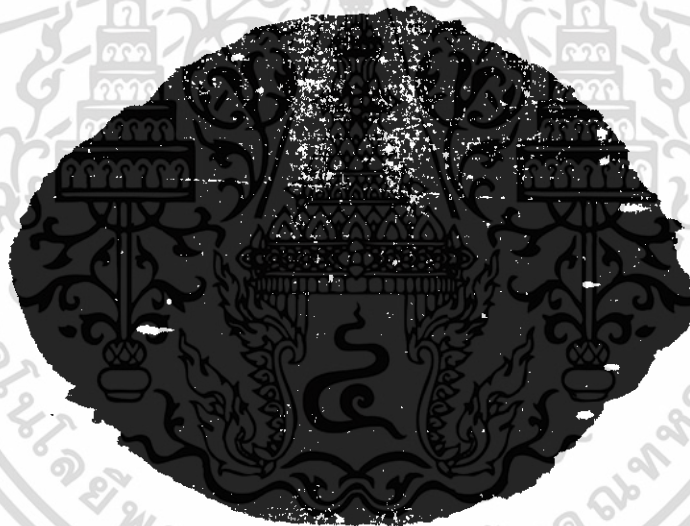
(1) โดยที่เถ้าลอยที่จะใช้ในการทดลองมีอยู่ 2 ชนิดคือเถ้าลอยถ่านหินที่ผ่านการคัดขนาดแล้วและเถ้าลอยแกลบในขั้นแรกของการทดลองนี้ จะทำการทดลองใช้เถ้าลอยจากถ่านหิน ซึ่งได้จากเผาไหม้เพื่อนำความร้อนไปใช้ที่ Boiler โดยจะต้องผ่านการคัดขนาดก่อนนำไปใช้เป็นส่วนผสม ซึ่งมีขนาด  $150 - 300 \mu\text{m}$  ดังรูปที่ 3.7 และเถ้าลอยที่มีขนาดต่ำกว่า  $150 \mu\text{m}$

(2) ในขั้นตอนที่สองจะทำการนำเถ้าลอยจากการเผาไหม้แกลบ ที่ได้จากการนำความร้อนไปใช้ที่ Boiler ซึ่งลักษณะของเถ้าลอยแกลบจะมีความละเอียดมากกว่าเถ้าลอยถ่านหิน แต่จะมีความชื้นอยู่บ้าง ซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 3.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 etailoyถ่านหินขนาด 150 – 300  $\mu\text{m}$



รูปที่ 3.8 etailoyแกลบขนาด < 150  $\mu\text{m}$

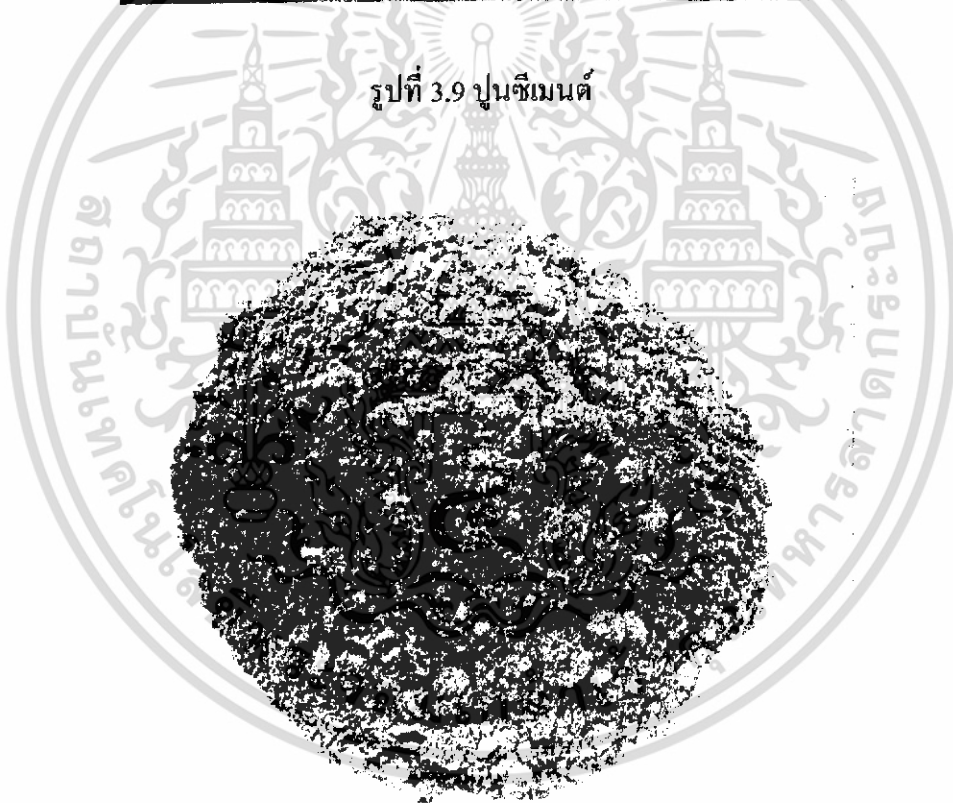
(3) ปูนซีเมนต์ที่ใช้ทำตัวอย่างทดสอบค่าความแข็งแรง และค่าการนำความร้อนจะเป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซึ่งจะมีคุณสมบัติในการแข็งตัวเร็ว ซึ่งจะใช้กับงานโครงสร้าง (ตราช้าง) ดังรูปที่ 3.9

(4) ทราย (Sand) ที่จะใช้ทำตัวอย่างทดสอบค่าความแข็งแรง และค่าการนำความร้อนเป็นส่วนผสมในการทดลอง ซึ่งเป็นทรายที่ทางโรงงานได้สั่งจากร้านวัสดุก่อสร้างเป็นทรายละเอียด ดังรูปที่ 3.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 ปูนซีเมนต์



รูปที่ 3.10 ทราย

การหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของทรายที่นำมาเป็นส่วนผสม โดยการใช้วิธีการ  
ร่อนด้วยตะแกรง (Sieve analysis) มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. นำทรายไปทำการลดความชื้น โดยการนำไปตากแดด
2. ชั่งทรายให้ได้น้ำหนัก 500 กรัม จำนวน 3 ตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. นำตัวอย่างที่ 1 ไปลงในชุดตะแกรงร่อนโดยเรียงตะแกรงร่อนตามขนาดของเบอร์ตะแกรงชั้นบนสุดจะมีขนาดรูตะแกรงใหญ่สุดโดยเรียงลำดับดังนี้ 425 $\mu\text{m}$ , 355 $\mu\text{m}$ , 300 $\mu\text{m}$ , 180  $\mu\text{m}$ , 150 $\mu\text{m}$ , 75 $\mu\text{m}$ , ต่ำกว่า 75  $\mu\text{m}$
4. ให้เครื่องเขย่าทำงานประมาณ 10 นาที
5. ชั่งตัวอย่างทรายที่อยู่บนตะแกรงแต่ละชั้น เพื่อนำมาใช้ในการคำนวณหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของตัวอย่างทราย
6. ทำการทดลองตามข้อ 2 ถึงข้อ 4 โดยการใช้ตัวอย่างของทรายอีก 2 ตัวอย่างตามน้ำหนักที่เตรียมไว้และจดข้อมูลไว้
7. คำนวณหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของตัวอย่างทราย

### 3.3 วิธีการทดลอง

#### 3.3.1 การทดลองตอนที่ 1

ทำตัวอย่างเพื่อทดสอบค่าความแข็งแรง (Compressive strength) และค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity) เพื่อหาอัตราส่วนผสมของเถ้าลอยที่เหมาะสม โดยตัวอย่างทดสอบค่าความแข็งแรง มีลักษณะเป็นทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 cm สูง 30 cm[9] และตัวอย่างทดสอบค่าการนำความร้อน มีลักษณะเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 30 × 30 [10] cm<sup>2</sup> สูง 2.5 cm

สำหรับอัตราส่วนของเถ้าลอยที่ใช้ผสมกับอิฐมวลเบาเดิมของบริษัทฯ ใช้อัตราส่วนผสมร้อยละ 10, 12.5, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก โดยเถ้าลอยด้านหินได้รับความอนุเคราะห์จาก บจก. ซีพีเอฟ จ. ลำพูน แบ่งเป็น 2 ขนาด คือ ขนาด  $\phi < 150 \mu\text{m}$  และ 150 – 300  $\mu\text{m}$  ส่วนเถ้าลอยแกลบได้รับความอนุเคราะห์จาก บจก. ไบโอมอส เพาเวอร์ จ. ชัยนาท การทดลองหาส่วนผสมต่างๆจะใช้วิธีแบบการนำไปใช้งานจริงโดยการทดสอบค่าความแข็งแรง ค่าการนำความร้อน และข้อมูลจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้เถ้าถ่านหินและจากแกลบ

วิธีการทดลองโดยใช้เถ้าลอยจากถ่านหินเป็นส่วนผสม

1. ทำการติดตั้งเครื่องโม้ผสมปูนโดยการหาพื้นที่วาง โม้ผสมปูนที่ลักษณะพื้นที่ราบเรียบ พร้อมทั้งลองเปิดเครื่องโม้ผสมว่าใช้งานได้ดี ก่อนผสมตัวอย่างทดลองที่จะนำไปทดสอบหาค่าความแข็งแรงและค่าการนำความร้อน

2. ทำการเตรียมส่วนผสมที่จะใช้ทำการทดลอง ที่จะนำไปทดสอบหาค่าความแข็งแรงและค่าการนำความร้อนซึ่งส่วนผสมหลักจะประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ ทราย เถ้าลอยถ่านหิน น้ำ และ โฟมอินทรีย์ ดังตารางที่ 3.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 ใช้เถ้าลอยถ่านหินขนาดต่ำกว่า 150  $\mu\text{m}$

สูตรที่	ปูน (kg)	ทราย (kg)	เถ้าลอย (kg)	น้ำ (kg)	โพมอินทรีย์ (ml)
1	10	10	2	6.0	17.6
2	10	10	2.5	6.0	18
3	10	10	3	6.5	18.4
4	10	10	4	6.5	19.2

ทำการเตรียมส่วนผสมเช่นเดียวกัน แต่จะใช้เถ้าลอยถ่านหินขนาด 150 - 300 $\mu\text{m}$  โดยซึ่งส่วนผสมดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ใช้เถ้าลอยถ่านหินขนาด 150 – 300  $\mu\text{m}$

สูตรที่	ปูน (kg)	ทราย (kg)	เถ้าลอย (kg)	น้ำ (kg)	โพมอินทรีย์ (ml)
5	10	10	2	6.0	17.6
6	10	10	2.5	6.0	18
7	10	10	3	6.5	18.4
8	10	10	4	6.5	19.2

3. นำส่วนผสมที่ซึ่งไว้คือ ปูน ทราย เถ้าลอยถ่านหิน เทใส่ในโม้ผสมปูนทำการเปิดเครื่องโม้โดยให้ ส่วนผสมเข้ากันประมาณ 5 – 10 นาที

4. เมื่อส่วนผสมเข้ากันแล้วให้เติมน้ำประมาณครึ่งหนึ่งก่อน เพื่อไม่ให้เกิดการติดของส่วนผสมที่พื้นโม้

5. เติมน้ำส่วนที่เหลือทั้งหมดลงไปโม้ (สังเกตส่วนผสมจะเริ่มเหลวและเข้ากันเป็นเนื้อเดียวกัน)

6. ทำการฉีดโพมอินทรีย์ลงไปในส่วนผสมของเถ้าลอยถ่านหินขนาด 150 - 300 $\mu\text{m}$  ที่ในปริมาณที่กำหนดไว้ ดังรูปที่ 3.11

7. เดินเครื่องโม้ผสม จนให้โพมอินทรีย์ผสมเข้ากันกับปูนซีเมนต์ ทราย และเถ้าลอยถ่านหินขนาด 150 - 300 $\mu\text{m}$  ดีแล้ว ก็ให้ทำการหยุดเครื่องโม้

8. นำน้ำมันมาทาเหล็กหล่อลูกปูนเพื่อป้องกันการเกาะตัวของคอนกรีตและทำให้สามารถแกะออกจากเหล็กหล่อได้ง่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.11 การฉีดยาอินทรีย์

9. นำส่วนผสมที่ได้ไปเทลงในบล็อกหล่อลูกปูนทรงกระบอกจำนวน 3 Mold ให้เส้นบล็อกออกมาข้าง เพื่อป้องกันการยุบตัวเวลาเริ่มแห้ง ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 การเทส่วนผสมที่ใช้แล้วลอด่านหินในบล็อกทรงกระบอก

10. นำส่วนผสมที่ได้ไปเทลงในแบบหล่อสี่เหลี่ยมจำนวน 2 Mold แล้วทำการปาดหน้าให้เรียบสม่ำเสมอ ดังรูปที่ 3.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.13 การทดสอบผสมที่ใช้เส้นใยถักในแบบสี่เหลี่ยม

11. ทิ้งไว้ประมาณ 12 ชม. ก็ทำการแกะออกจากแบบหล่อได้ ดังรูปที่ 3.14
12. ทำการทดลองซ้ำตามข้อ 3 ถึง 10 จนครบทั้งหมด 8 ชุด
13. ส่วนของตัวอย่างทรงกระบอกจะนำไปบ่มคอนกรีต โดยการแช่น้ำหรือใช้กระสอบป่านคลุมและรดน้ำให้เปียกชุ่มเป็นเวลา 28 วัน เมื่อครบกำหนดจะไปทดสอบค่าความแข็งแรงที่ภาควิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



รูปที่ 3.14 ส่วนผสมที่ใช้เส้นใยถักที่จับตัวกันแล้ว

14. ส่วนตัวอย่างแผ่นสี่เหลี่ยมจะนำไปตากแดดให้แห้ง และนำไปทดสอบค่าการนำความร้อนที่กรมวิทยาศาสตร์บริการ กระทรวงวิทยาศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 15. บันทึกผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

## 16. สรุปผลการทดลอง

## วิธีการทดลองโดยใช้ถั่วลอยกแกลบเป็นส่วนผสม

การทดลองหาส่วนผสมต่างๆจะใช้วิธีแบบการนำไปใช้งานจริง โดยการทดสอบค่าความแข็งแรง ค่าการนำความร้อน และข้อมูลจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้ถั่วลอยกแกลบเป็นส่วนผสม

1. ทำการติดตั้งโม้ผสมปูน โดยการหาพื้นที่วางโม้ผสมปูนที่ลักษณะพื้นที่ราบเรียบ พร้อมทั้งลองเปิดเครื่อง โม้ผสมว่าใช้งานได้

2. ทำการเตรียมส่วนผสมประกอบด้วย ปูน ทราย ถั่วลอยกแกลบ น้ำ โฟมอินทรีย์ ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ใช้ถั่วลอยกแกลบเป็นส่วนผสม

สูตรที่	ปูน (kg)	ทราย (kg)	ถั่วลอยก (kg)	น้ำ (kg)	โฟมอินทรีย์ (ml)
9	10	10	2	5.5	17.6
10	10	10	2.5	6.0	18
11	10	10	10	8.0	18.4
12	10	10	4	8.4	19.2

3. นำส่วนผสมที่ชั่งไว้คือ ปูน ทราย ถั่วลอยกแกลบ เทใส่ใน โม้ผสมปูนทำการเปิดเครื่อง โม้โดยให้ ส่วนผสมเข้ากันประมาณ 5 – 10 นาที

4. เมื่อส่วนผสมเข้ากันแล้วให้เติมน้ำประมาณครึ่งหนึ่งก่อน เพื่อไม่ให้เกิดการติดของส่วนผสมที่พื้นโม้

5. เติมน้ำส่วนที่เหลือทั้งหมดลงไป (สังเกตส่วนผสมจะเริ่มเหลวเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน)

6. ทำการฉีดโฟมอินทรีย์ลงไปในส่วนผสมในปริมาณที่กำหนดไว้

7. เดินเครื่อง โม้จน โฟมอินทรีย์ผสมเข้ากันกับส่วนผสมดีแล้ว ก็ให้ทำการหยุดเครื่อง โม้

8. นำน้ำมันมาทาบล้อกหล่อลูกปูน เพื่อป้องกันการเกาะตัวของคอนกรีต

9. นำส่วนผสมที่ได้ไปเทลงในบล็อกหล่อลูกปูนทรงกระบอกจำนวน 3 Mold ให้สันบล้อกออกมาบ้าง เพื่อป้องกันการยุบตัวเวลาเริ่มแห้งดัง รูปที่ 3.15

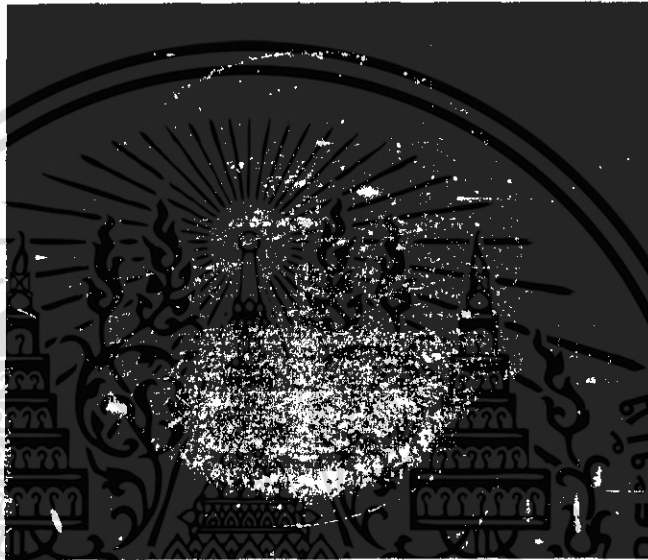
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10. นำส่วนผสมที่ได้ไปเทลงในบล็อกหล่อสี่เหลี่ยมจำนวน 2 Mold แล้วทำการปาดหน้าให้เรียบสม่ำเสมอ ดังรูปที่ 3.16

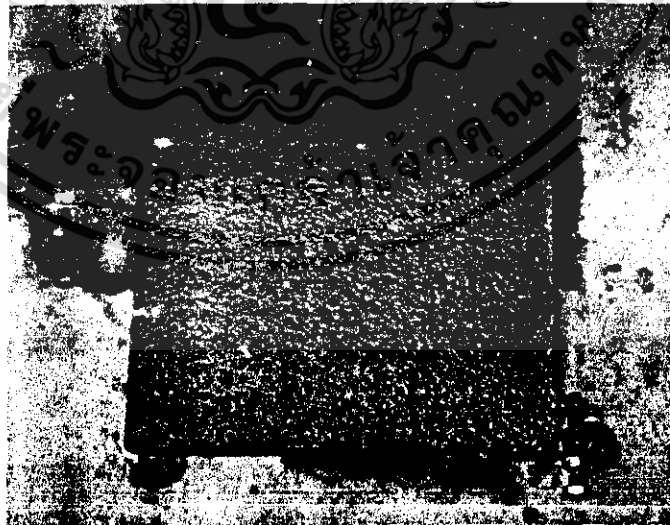
11. ทิ้งไว้ประมาณ 12 ชม. ส่วนผสมก็ทำการแกะออกจากแบบหล่อได้ดังรูปที่ 3.17

12. ทำการทดลองซ้ำตามข้อ 3 ถึง 10 จนครบทั้งหมด 8 สูตร

13. ส่วนของตัวอย่างทรงกระบอกจะนำไปบ่มคอนกรีต โดยการแช่ในน้ำหรือใช้กระสอบป่านคลุมและรดน้ำให้เปียกชุ่มเป็นเวลา 28 วัน เมื่อครบกำหนดจะไปทดสอบค่าความแข็งแรงที่ภาควิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



รูปที่ 3.15 การเทส่วนผสมที่ใช้เส้นลอยเกลบในบล็อกทรงกระบอก



รูปที่ 3.16 การเทส่วนผสมที่ใช้เส้นลอยเกลบในแบบสี่เหลี่ยม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.17 ส่วนผสมที่ใช้แล้วลอยแกลบที่จับตัวกันแล้ว

14. ส่วนตัวอย่างแผ่นสี่เหลี่ยมจะนำไปตากแดดให้แห้ง และนำไปทดสอบค่าการนำความร้อนที่กรมวิทยาศาสตร์บริการ กระทรวงวิทยาศาสตร์
15. บันทึกผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง
16. สรุปผลการทดลอง

### 3.3.2 การทดลองตอนที่ 2

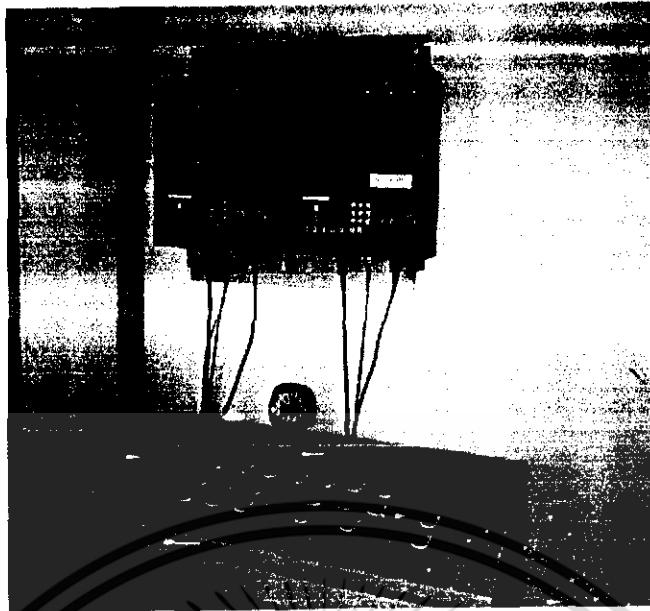
ผลการทดลองที่ได้จากตัวอย่าง ที่มีส่วนผสมของเถ้าลอยจากถ่านหินและเถ้าลอยจากแกลบ พบว่า อัตราส่วนผสมเถ้าลอยจากแกลบ 12.5% โดยน้ำหนัก มีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการผลิตอิฐมวลเบา และนำมาก่อสร้างห้องตัวอย่างเพื่อใช้ทำการทดสอบเชิงเปรียบเทียบกับห้องตัวอย่างที่ใช้อิฐมวลเบา โดยจะทำการก่อสร้างห้องตัวอย่างจากอิฐทั้ง 2 ประเภท ให้มีขนาดและลักษณะเดียวกัน คือ มีขนาด (กxขxส) 2.3x2.3x2.4 เมตร ด้านบนบุด้วยฉนวนกันความร้อนไมโครไฟเบอร์หนา 3 นิ้ว และติดแผ่นฝ้ายิปซัม เพื่อป้องกันความร้อนจากหลังคา ส่วนด้านหน้าห้องมีประตูทางเข้า 1 บาน และหันหน้าบ้านไปทางทิศใต้

1. ทำการเตรียมส่วนผสมประกอบด้วย ปูน ทราย เถ้าลอยแกลบ น้ำ โฟมอินทรีย์ดังตาราง 3.4 โดยที่ปูน ทรายและน้ำ จะใช้การควบคุมทางน้ำจ่อเพื่อชั่งน้ำหนักให้ได้ตารางสูตรดังรูปที่ 3.18

ตารางที่ 3.4 ใช้เถ้าลอยแกลบต่ำกว่า 150 $\mu$ m เป็นส่วนผสม

% ของการผสมเถ้าลอย	ปูน (kg)	ทราย (kg)	เถ้าลอย (kg)	น้ำ (kg)	โฟมอินทรีย์ (ml)
12.5	300	300	75	240	576

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.18 ชุดควบคุมน้ำหนัก

2. ส่วนถ้ำลอยเกลบนนั้นจะเทหลังจากมีการเตรียมส่วนผสมข้างต้นเสร็จแล้วดังรูปที่ 3.19

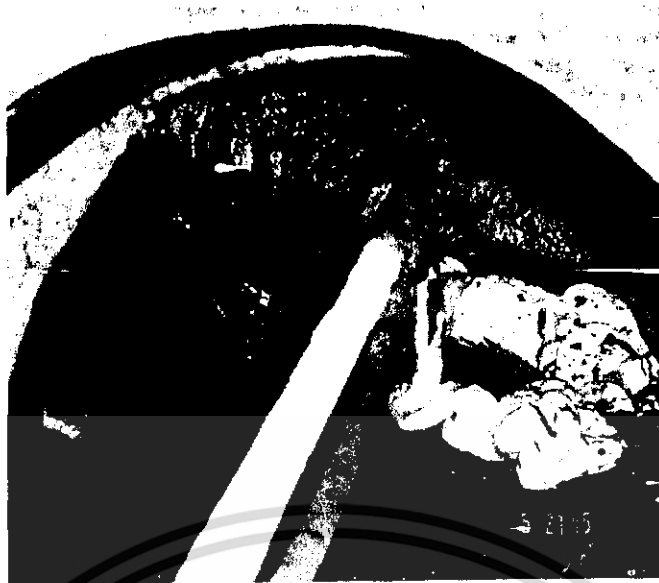


รูปที่ 3.19 ถ้ำลอยเกลบ

3. นำส่วนผสมทั้งหมดเทลงในเครื่องผสมของทางโรงงาน เดินเครื่องประมาณ 10 นาที ให้ส่วนผสมเข้ากันดีแล้ว ให้เติมน้ำลงไปในปริมาณที่เตรียมไว้

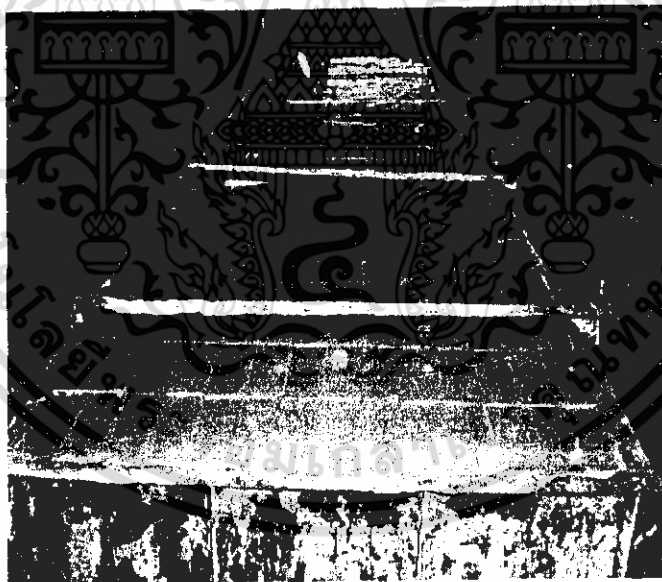
4. เดินเครื่องไม่อีก 5 นาทีแล้วทำการฉีดโฟมอินทรีย์ลงไป เดินเครื่องไม่อีก 40 – 60 วินาที เพื่อป้องกันการแตกตัวของโฟมอินทรีย์และทำการปิดเครื่องไม่ ดังรูปที่ 3.20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.20 การฉีดโฟมอินทรีย์

5. เทส่วนผสมภายในเครื่องไม้ผสมลงในแบบที่เตรียมไว้ซึ่งมีขนาด ยาว 50 ซม. สูง 20 ซม. หน้า 7 ซม. เท่ากับขนาดของก้อนอิฐ โดยที่ 1 แบบจะมีจำนวน 140 ก้อนดังรูปที่ 3.21

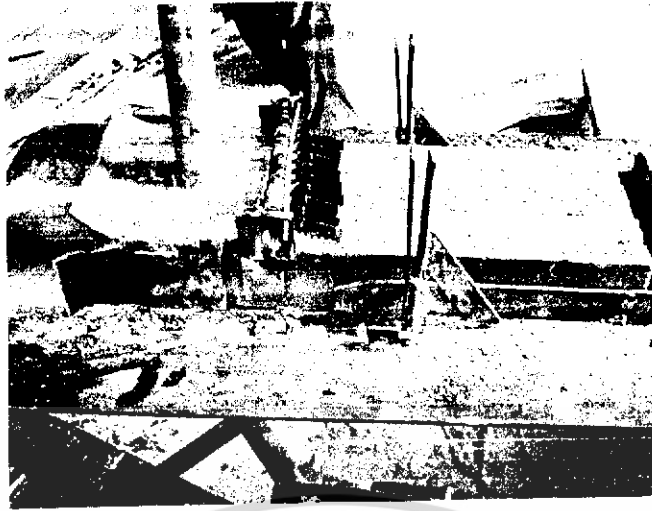


รูปที่ 3.21 แบบหล่อก้อนอิฐ

6. ทิ้งส่วนผสมไว้ในแบบประมาณ 12 ชั่วโมง หลังจากนั้นจึงทำการแกะออกจากแบบ  
ได้โดยใช้เครื่องมือเช่น ค้อน สกัด

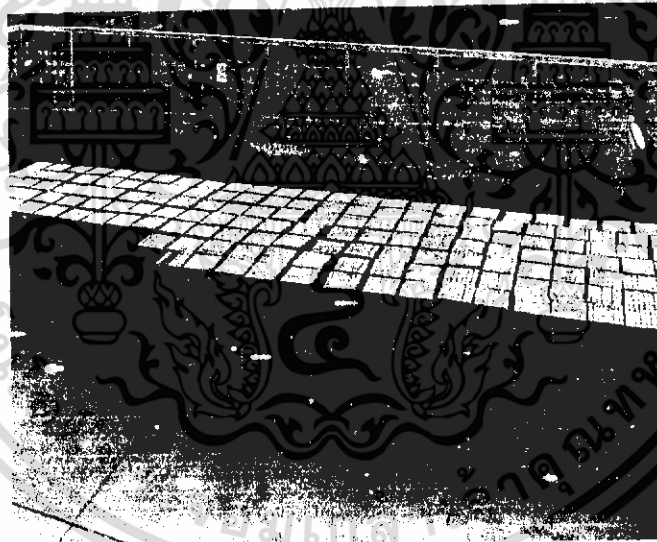
7. ทำการขูดลายที่ตัวก้อนอิฐ เพื่อช่วยให้เกิดการยึดเกาะของปูนฉาบดังรูปที่ 3.22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.22 การขุดลอกก้อนอิฐ

8. นำอิฐที่ผ่านการขุดลอกแล้วไปตากแดดให้ก้อนอิฐแห้ง โดยใช้เวลาประมาณ 1-2 วัน  
ถึงนำไปใช้งานได้ดังรูปที่ 3.23



รูปที่ 3.23 ก้อนอิฐที่ตากแดดแล้ว

9. อิฐมวลเบาที่ผสมแล้วลอยแกลบตากแดดจนแห้งแล้วก็นำมาสร้างห้องทดสอบที่มี  
ขนาด (ก x ย x ส) 2.3 x 2.3 x 2.4 เมตร เพื่อใช้ทดสอบในสภาพการใช้งานจริงดังรูปที่ 3.24 , 3.25

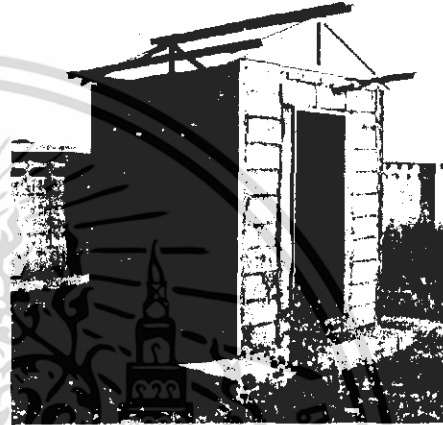
10. ทำการสร้างห้องทดสอบที่สร้างมาจากอิฐมวลเบาในบริเวณที่ใกล้เคียงกัน ที่มีขนาด  
(ก x ย x ส) 2.3 x 2.3 x 2.4 เมตร เพื่อใช้ทดสอบการใช้งานในสภาพการใช้งานจริงดังรูปที่ 3.26 , 3.27  
บริเวณพื้นที่ของบริษัท Professional Block จำกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

11. ทำการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิ้ลเพื่อใช้เก็บข้อมูลอุณหภูมิภายในห้องทดสอบทั้ง 2 ห้อง ซึ่งจะติดตั้งไว้บริเวณกลางห้องทดสอบ และต่อเข้ากับชุดเก็บข้อมูล (Data locker) ดังรูปที่ 3.28
12. การวัดอุณหภูมิของฝาผนังนั้นจะใช้เครื่องวัดที่เป็นระบบดิจิทัล ดังรูปที่ 3.29 โดยจะวัดอุณหภูมิฝาผนังทั้งภายนอกและภายใน ผนังละ 5 จุดและหาค่าเฉลี่ย



รูปที่ 3.24 ห้องทดสอบอิฐมอญ



รูปที่ 3.26 ห้องทดสอบอิฐมวลเบา

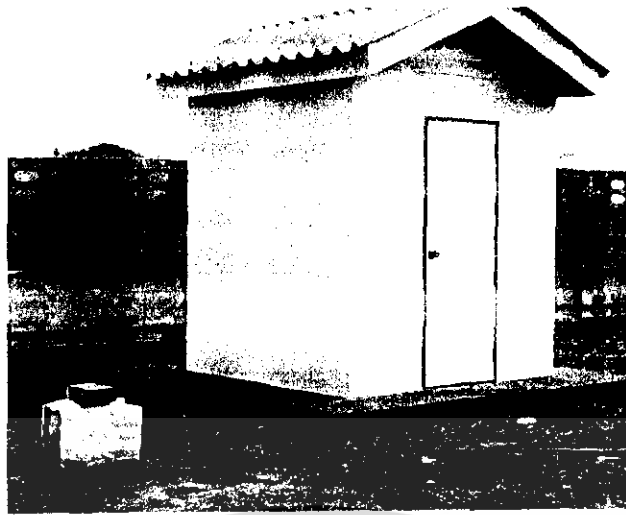


รูปที่ 3.25 ห้องทดสอบอิฐมอญสมบูรณ์



รูปที่ 3.27 ห้องทดสอบอิฐมวลเบาสมบูรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.28 การติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล



รูปที่ 3.29 เครื่องวัดอุณหภูมิ

13. การวัดอุณหภูมิบริเวณรอบๆ ห้องทดสอบและความชื้นของอากาศจะใช้เครื่องมือ

ดังรูปที่ 3.30



รูปที่ 3.30 เครื่องวัดความชื้นอากาศและอุณหภูมิภายนอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการการทดลอง

#### 4.1 ผลการการทดลองตอนที่ 1

##### 4.1.1 ผลการทดสอบหาค่าความแข็งแรงและค่าความหนาแน่น

ตารางที่ 4.1 การใช้เถ้าลอยถ่านหินเป็นส่วนผสมขนาด 300 – 150  $\mu\text{m}$

% ผสมของเถ้าลอย	ลูกที่	น้ำหนัก (kg)	แรงกด (kg/cm <sup>2</sup> )	ความหนาแน่น (kg/m <sup>3</sup> )
10	1	6.60	43.55	1244
	2	6.24	54.32	1177
	3	5.98	50.33	1128
	ค่าเฉลี่ย	6.27	49.4	1183
12.5	1	6.28	60.17	1184
	2	6.25	60.40	1178
	3	6.50	53.80	1225
	ค่าเฉลี่ย	6.34	58.13	1195
15	1	6.23	39.68	1174
	2	5.97	32.24	1132
	3	6.03	32.86	1138
	ค่าเฉลี่ย	6.08	34.93	1148
20	1	6.03	51.54	1137
	2	5.92	40.66	1117
	3	5.90	45.70	1113
	ค่าเฉลี่ย	5.95	46.0	1122

ตารางที่ 4.2 การใช้เถ้าลอยถ่านหินเป็นส่วนผสมขนาดต่ำกว่า 150  $\mu\text{m}$

% ผสมของเถ้าลอย	ลูกที่	น้ำหนัก (kg)	แรงกด (kg/cm <sup>2</sup> )	ความหนาแน่น (kg/m <sup>3</sup> )
10	1	6.46	36.69	1217.92
	2	6.47	53.18	1223.06
	3	6.35	33.93	1196.78
	ค่าเฉลี่ย	6.43	41.27	1212.59

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

12.5	1	7.73	92.77	1460.75
	2	7.30	89.79	1385.06
	3	7.44	67.77	1411.62
	ค่าเฉลี่ย	7.49	83.44	1419.14
15	i	6.62	41.48	1296.86
	2	6.41	48.14	1275.05
	ค่าเฉลี่ย	6.52	44.81	1285.96
20	1	6.20	31.62	1175.95
	2	6.41	37.16	1206.86
	3	6.19	27.96	1174.45
	ค่าเฉลี่ย	6.27	32.25	1185.75

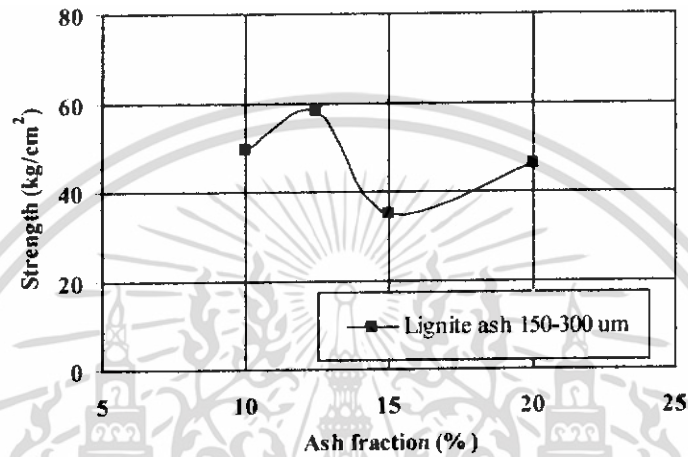
ตารางที่ 4.3 การใช้เถ้าลอยแกลบเป็นส่วนผสมขนาดต่ำกว่า 150  $\mu\text{m}$

% ผสมของเถ้าลอย	ลูกที่	น้ำหนัก (kg)	แรงกด ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )	ความหนาแน่น ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
10	1	5.63	20.72	1060.36
	2	5.54	33.77	1039.24
	3	5.43	41.27	1212.59
	ค่าเฉลี่ย	5.53	26.96	1104.06
12.5	1	5.93	29.31	1126.27
	2	5.80	27.40	1100.83
	3	5.49	28.88	1034.70
	ค่าเฉลี่ย	5.74	28.53	1087.25
15	1	5.22	17.06	986.39
	2	5.45	19.28	1026.11
	ค่าเฉลี่ย	5.34	18.17	1006.25
20	1	5.80	22.92	1104.54
	2	5.40	20.15	1024.22
	3	5.53	21.87	1041.53
	ค่าเฉลี่ย	5.58	21.65	1056.76

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

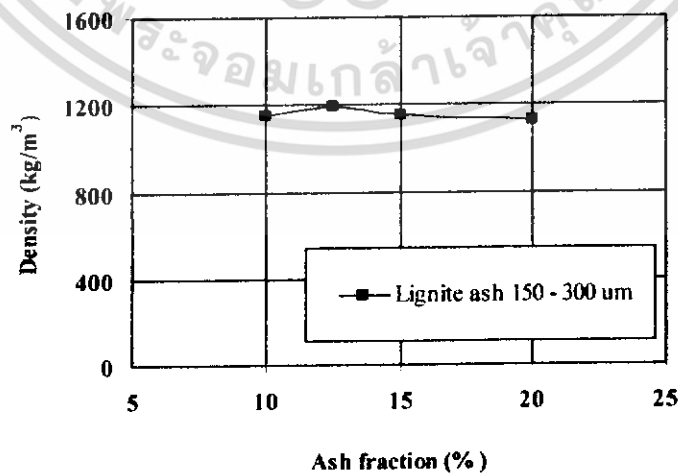
#### 4.1.2 ผลการทดสอบค่าความแข็งแรงของถั่วลอยถ่านหินขนาด $\phi = 150 - 300 \mu\text{m}$

จากรูปที่ 4.1 พบว่า ที่อัตราส่วนผสมถั่วลอยถ่านหินขนาด  $\phi = 150 - 300 \mu\text{m}$  ที่ร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก อีฐมวลเบาจะให้ค่าค่าความแข็งแรงต่ำที่สุด คือ  $35 \text{ kg/cm}^2$  และที่ร้อยละ 12.5 โดยน้ำหนัก อีฐมวลเบาจะให้ค่าค่าความแข็งแรงสูงที่สุด คือ  $50 \text{ kg/cm}^2$  และพบว่าที่ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ค่าความแข็งแรงเริ่มมีค่าเพิ่มขึ้น มต์ค่าความแข็งแรงจะน้อยกว่าที่ร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง Strength กับ Ash fraction

จากรูปที่ 4.2 พบว่า เมื่ออัตราส่วนผสมของถั่วลอยถ่านหินขนาด  $\phi = 150 - 300 \mu\text{m}$  ที่เพิ่มขึ้น ค่าความหนาแน่นของอีฐมวลเบาจะมีค่าความหนาแน่นลดลง และที่ร้อยละ 12.5 โดยน้ำหนัก อีฐมวลเบาจะให้ค่าค่าความหนาแน่นสูงที่สุด และที่ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ค่าความหนาแน่นจะมีค่าน้อยที่สุด

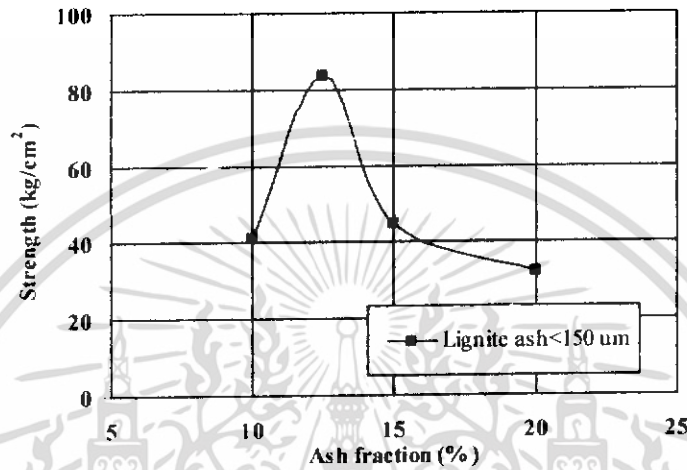


รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง Density กับ Ash fraction

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

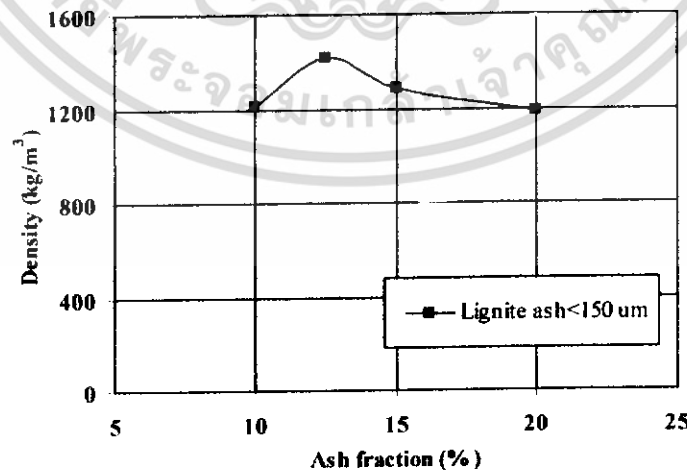
#### 4.1.3 ผลการทดสอบค่าความแข็งแรงของเถ้าลอยผ่านหินขนาด $\phi < 150 \mu\text{m}$

จากรูปที่ 4.3 พบว่า ที่อัตราส่วนผสมเถ้าลอยผ่านหินขนาด  $\phi < 150 \mu\text{m}$  ที่ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก อิฐมวลเบาจะให้ค่าค่าความแข็งแรงต่ำที่สุด คือ  $32 \text{ kg/cm}^2$  และที่ร้อยละ 12.5 โดยน้ำหนัก อิฐมวลเบาจะให้ค่าค่าความแข็งแรงสูงที่สุด คือ  $81 \text{ kg/cm}^2$



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง Strength กับ Ash fraction

จากรูปที่ 4.4 พบว่า เมื่ออัตราส่วนผสมของเถ้าลอยผ่านหินขนาด  $\phi < 150 \mu\text{m}$  ที่เพิ่มขึ้น ค่าความหนาแน่นของอิฐมวลเบาจะมีค่าความหนาแน่นลดลง และที่ร้อยละ 12.5 โดยน้ำหนัก อิฐมวลเบาจะให้ค่าค่าความหนาแน่นสูงที่สุด และที่ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ค่าความหนาแน่นจะมีค่าน้อยที่สุด

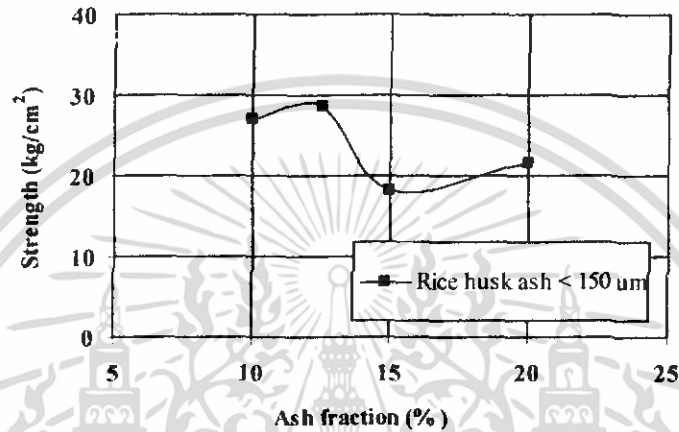


รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง Density กับ Ash fraction

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

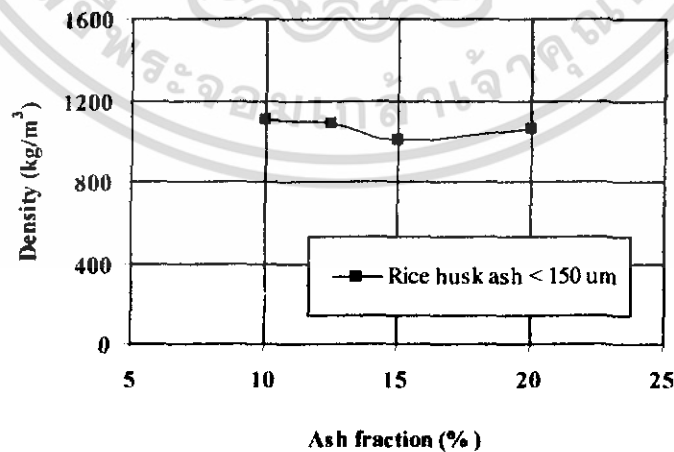
#### 4.1.4 ผลการทดสอบค่าความแข็งแรงของตัวอย่างขนาด $\phi < 150 \mu\text{m}$

จากรูปที่ 4.5 พบว่า ที่อัตราส่วนผสมแฉะลอยเกล็ดขนาด  $\phi < 150 \mu\text{m}$  ที่ร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก อิฐมวลเบาจะให้ค่าความแข็งแรงต่ำที่สุด คือ  $18 \text{ kg/cm}^2$  และที่ร้อยละ 12.5 โดยน้ำหนัก อิฐมวลเบาจะให้ค่าความแข็งแรงสูงที่สุด คือ  $31 \text{ kg/cm}^2$  และพบว่าที่ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ค่าความแข็งแรงเริ่มมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ค่าความแข็งแรงจะน้อยกว่าที่ร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง Strength กับ Ash fraction

จากรูปที่ 4.6 พบว่า เมื่ออัตราส่วนผสมของแฉะลอยเกล็ดขนาด  $\phi < 150 \mu\text{m}$  เพิ่มขึ้นค่าความหนาแน่นของอิฐมวลเบาจะมีค่าความหนาแน่นลดลง และที่ร้อยละ 12.5 โดยน้ำหนัก อิฐมวลเบาจะให้ค่าความหนาแน่นสูงที่สุด และที่ร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก ค่าความหนาแน่นจะมีค่าน้อยที่สุด

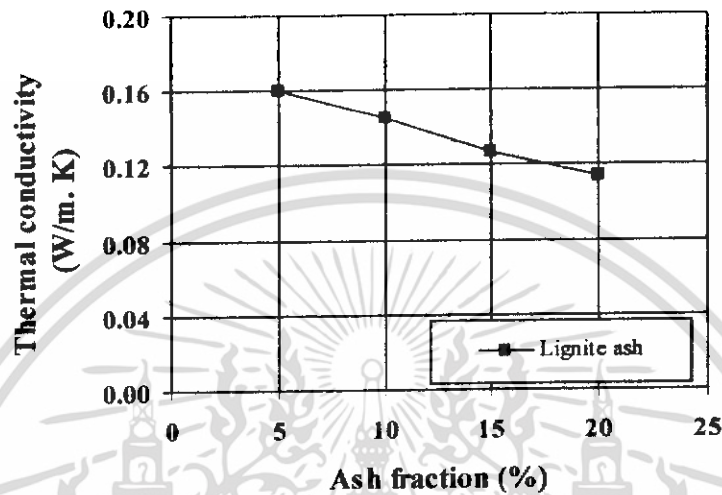


รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง Density กับ Ash fraction

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.5 ผลการทดสอบค่าการนำความร้อนของเถ้าลอยถ่านหิน

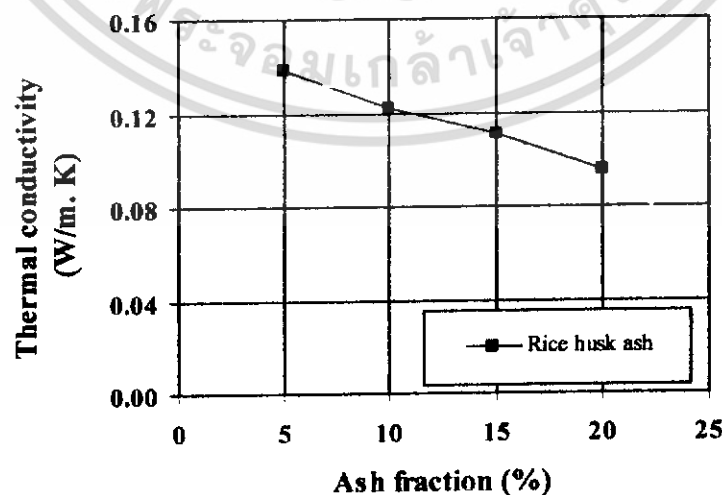
จากรูปที่ 4.6 พบว่า เมื่ออัตราส่วนผสมของเถ้าลอยถ่านหินเพิ่มขึ้นค่าการนำความร้อน (ความเป็นฉนวน) จะมีค่าการนำความร้อนต่ำลง (ความเป็นฉนวนเพิ่มขึ้น)



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง Thermal conductivity กับ Ash fraction

#### 4.1.6 ผลการทดสอบค่าการนำความร้อนของเถ้าลอยแกลบ

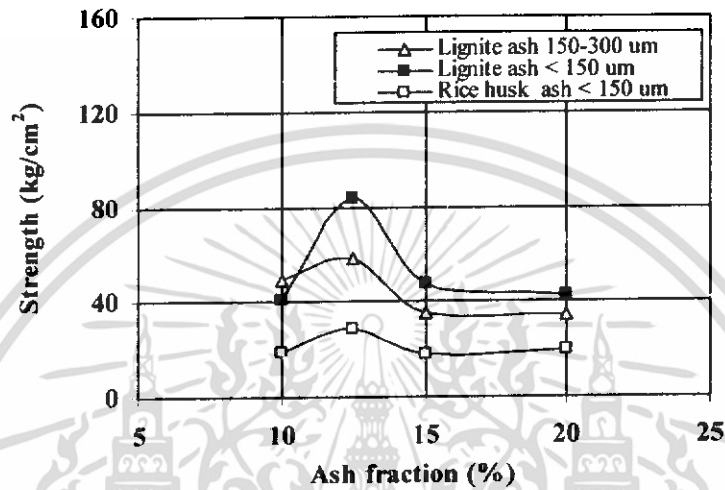
จากรูปที่ 4.6 พบว่า เมื่ออัตราส่วนผสมของเถ้าลอยแกลบเพิ่มขึ้นค่าการนำความร้อน (ความเป็นฉนวน) จะมีค่าการนำความร้อนต่ำลง (ความเป็นฉนวนเพิ่มขึ้น)



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง Thermal conductivity กับ Ash fraction

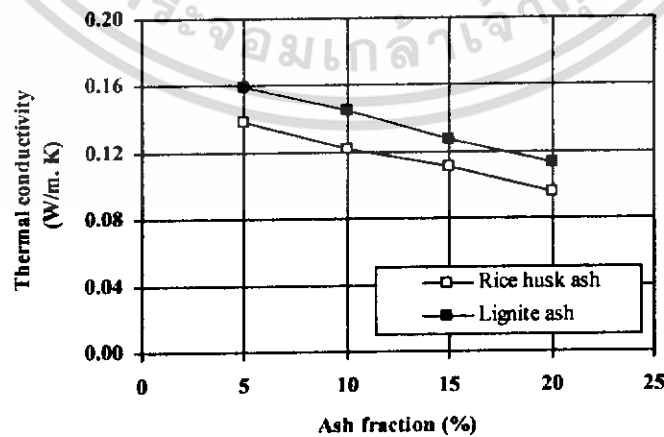
#### 4.1.7 การเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงและค่าการนำความร้อน

จากรูปที่ 4.9 พบว่า ที่อัตราส่วนผสมแฉะล่อยร้อยละ 12.5 ของทั้งแฉะล่อย่านหินและแกลบ อิฐมวลเบาจะให้ค่าความแข็งแรงสูงที่สุด คือ 81, 50 และ 31 kg/cm<sup>2</sup> ตามลำดับ โดยค่าความแข็งแรงที่ได้จากการผสมแฉะล่อย่านหินละเอียด ( $\phi < 150 \mu\text{m}$ ) จะให้ค่าความแข็งแรงสูงกว่าของแฉะล่อย่านหินหยาบ ( $\phi = 150 - 300 \mu\text{m}$ )



รูปที่ 4.9 ค่าความแข็งแรงของอิฐมวลเบาที่อัตราส่วนผสมต่างๆของแฉะล่อย่านหินและแฉะล่อยกลบ

รูปที่ 4.10 แสดงถึงค่าการนำความร้อนของอิฐมวลเบาที่เปลี่ยนแปลงไปตามอัตราส่วนผสมแฉะล่อยที่เพิ่มขึ้น ซึ่งจะเห็นได้ว่าแฉะล่อยกลบจะให้ค่าการนำความร้อนที่ต่ำกว่าแฉะล่อย่านหินที่อัตราส่วนผสมแฉะล่อยค่าเดียวกัน และเมื่อเปรียบเทียบกับอิฐมวลเบาสูตรเดิมของบริษัทฯ พบว่า เมื่อผสมแฉะล่อยในอิฐมวลเบา จะทำให้ค่าการนำความร้อนของอิฐมวลเบามีค่าต่ำลง คือ มีความเป็นฉนวนความร้อนสูงขึ้น



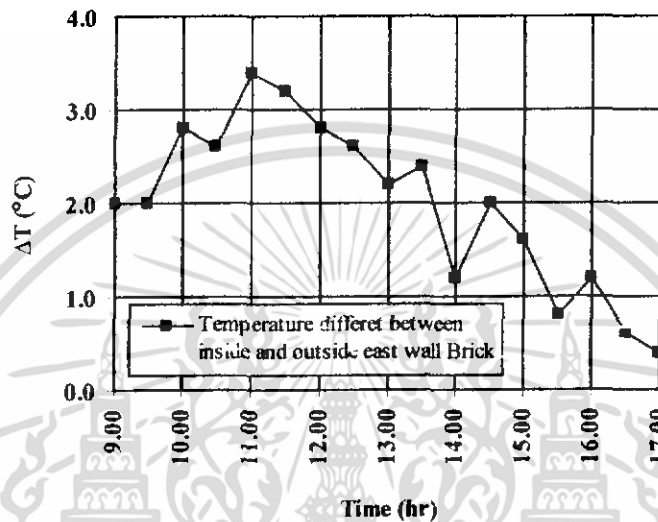
รูปที่ 4.10 ค่าการนำความร้อนของอิฐมวลเบาที่อัตราส่วนผสมต่างๆของแฉะล่อย่านหินและแกลบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 ผลการทดลองตอนที่ 2

### 4.2.1 ผลต่างอุณหภูมิผนังด้านนอกกับด้านในของอิฐมอดูด้านทิศตะวันออก

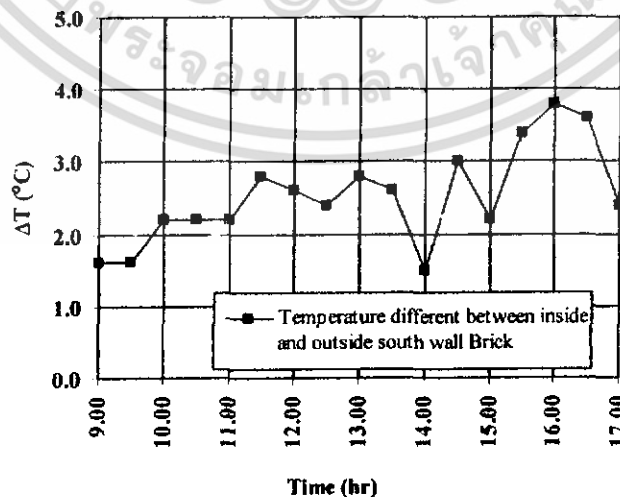
จากรูปที่ 4.11 ผลต่างอุณหภูมิผนังด้านนอกกับด้านในของอิฐมอดูด้านทิศตะวันออก จะมีค่าเฉลี่ยประมาณ 2 องศาเซลเซียส ซึ่งผนังทิศตะวันออกจะถูกแสงแดดในเวลาประมาณ 9.00-11.30 นาฬิกา



รูปที่ 4.11 ผลต่างอุณหภูมิผนังด้านนอกกับด้านในของอิฐมอดูด้านทิศตะวันออก

### 4.2.2 ผลต่างอุณหภูมิผนังด้านนอกกับด้านในของอิฐมอดูด้านทิศตะวันตก

จากรูปที่ 4.12 ผลต่างอุณหภูมิผนังด้านนอกกับด้านในของอิฐมอดูด้านทิศตะวันตก จะมีค่าเฉลี่ยประมาณ 2.5 องศาเซลเซียส ซึ่งผนังทิศตะวันตกจะถูกแสงแดดในเวลาประมาณ 13.00-17.00 นาฬิกา

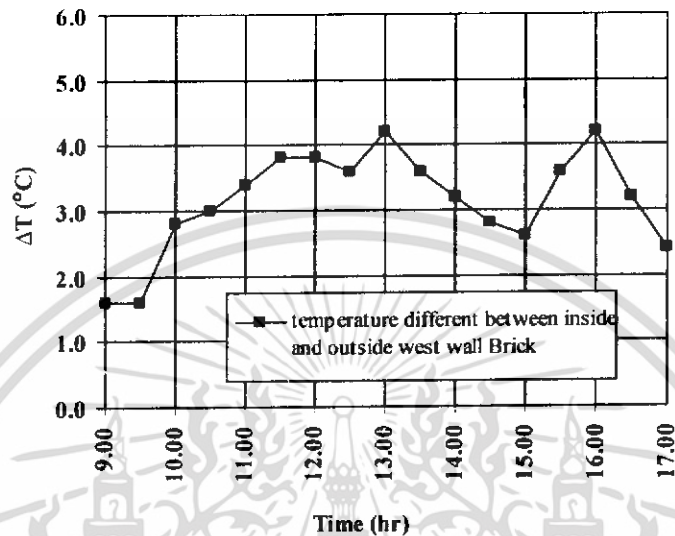


รูปที่ 4.12 ผลต่างอุณหภูมิผนังด้านนอกกับด้านในของอิฐมอดูด้านทิศตะวันตก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.3 ผลต่างอุณหภูมิผนังด้านนอกกับด้านในของอิฐมอดูด้านทิศใต้

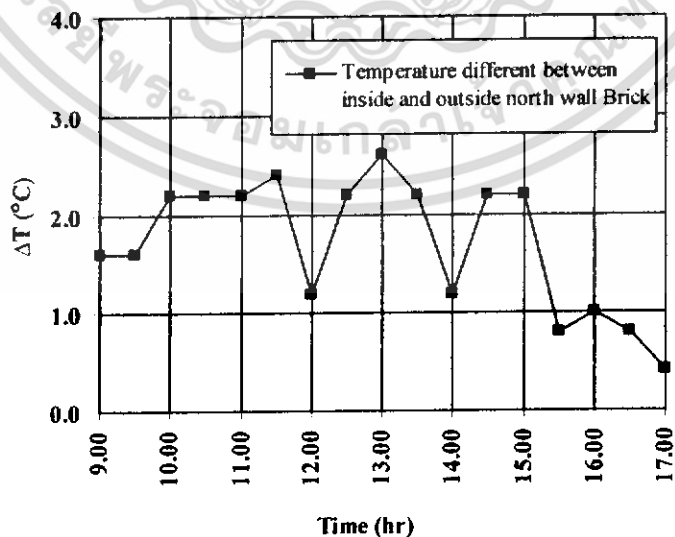
จากรูปที่ 4.13 ผลต่างอุณหภูมิผนังด้านนอกกับด้านในของอิฐมอดูด้านทิศใต้ จะมีค่าเฉลี่ยประมาณ 3 องศาเซลเซียส ซึ่งผนังทิศใต้ จะถูกแสงแดดในเวลาประมาณ 11.00-15.00 นาฬิกา



รูปที่ 4.13 ผลต่างอุณหภูมิผนังด้านนอกกับด้านในของอิฐมอดูด้านทิศใต้

#### 4.2.4 ผลต่างอุณหภูมิผนังด้านนอกกับด้านในของอิฐมอดูด้านทิศเหนือ

จากรูปที่ 4.14 ผลต่างอุณหภูมิผนังด้านนอกกับด้านในของอิฐมอดูด้านทิศเหนือ จะมีค่าเฉลี่ยประมาณ 1.7 องศาเซลเซียส ซึ่งผนังทิศเหนือจะไม่ถูกแสงแดดโดยตรงแต่มีการแผ่ของแสงแดด



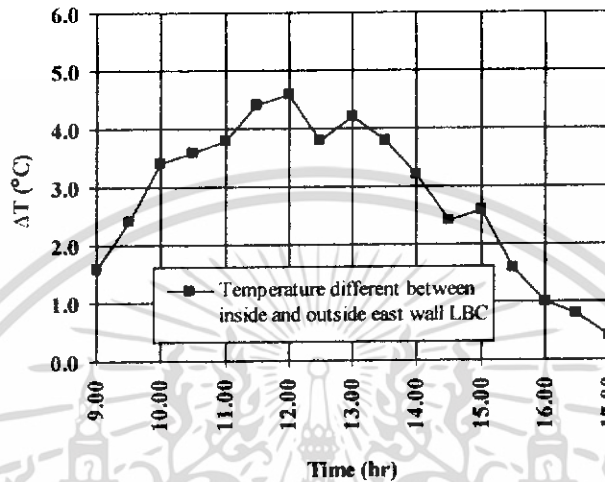
รูปที่ 4.14 ผลต่างอุณหภูมิผนังด้านนอกกับด้านในของอิฐมอดูด้านทิศเหนือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.5 ผลต่างอุณหภูมิผนังด้านนอกกับด้านในของอิฐมวลเบาผสมเถ้าลอยเคลือบด้านทิศ

##### ตะวันออก

จากรูปที่ 4.15 ผลต่างอุณหภูมิผนังด้านนอกกับด้านในของอิฐมวลเบาผสมเถ้าลอยเคลือบด้านทิศตะวันออก จะมีค่าเฉลี่ยประมาณ 3 องศาเซลเซียส ซึ่งผนังทิศตะวันออกจะถูกแสงแดดในเวลา ประมาณ 11.00-15.00 นาฬิกา



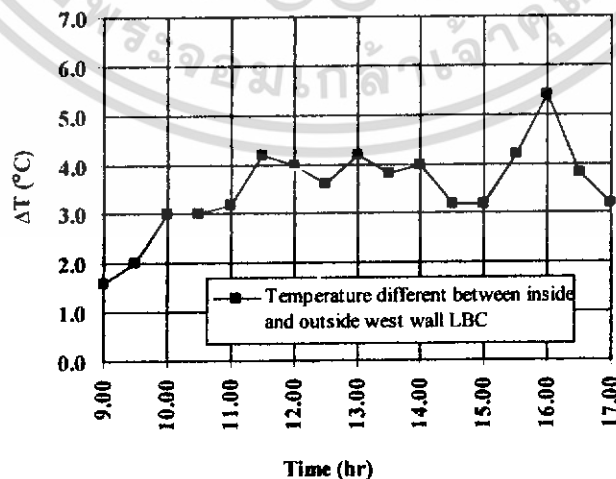
รูปที่ 4.15 ผลต่างอุณหภูมิผนังด้านนอกกับด้านในของอิฐมวลเบาผสมเถ้าลอยเคลือบด้านทิศ

##### ตะวันออก

#### 4.2.6 ผลต่างอุณหภูมิผนังด้านนอกกับด้านในของอิฐมวลเบาผสมเถ้าลอยเคลือบด้านทิศ

##### ตะวันตก

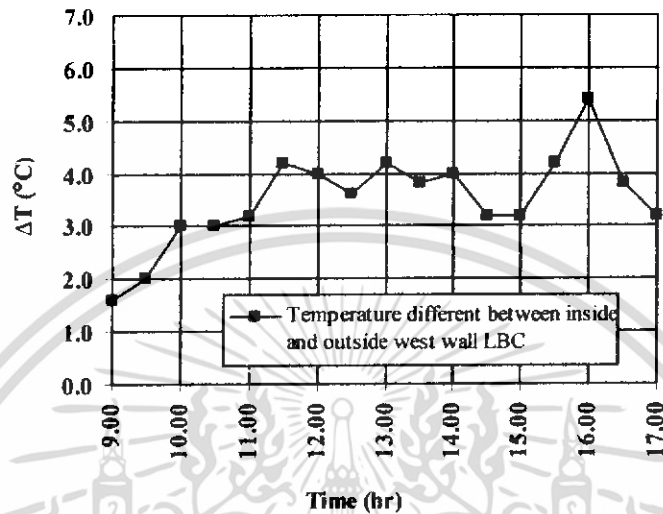
จากรูปที่ 4.16 ผลต่างอุณหภูมิผนังด้านนอกกับด้านในของอิฐมวลเบาผสมเถ้าลอยเคลือบด้านทิศตะวันตก จะมีค่าเฉลี่ยประมาณ 3.5 องศาเซลเซียส ซึ่งผนังทิศตะวันตกจะถูกแสงแดดในเวลา ประมาณ 13.00-17.00 นาฬิกา



รูปที่ 4.16 ผลต่างอุณหภูมิผนังด้านนอกกับด้านในของอิฐมวลเบาผสมเถ้าลอยเคลือบด้านทิศตะวันตก เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.7 ผลต่างอุณหภูมิผนังด้านนอกกับด้านในของอิฐมวลเบาผสมเถ้าลอยเคลือบด้านทิศใต้

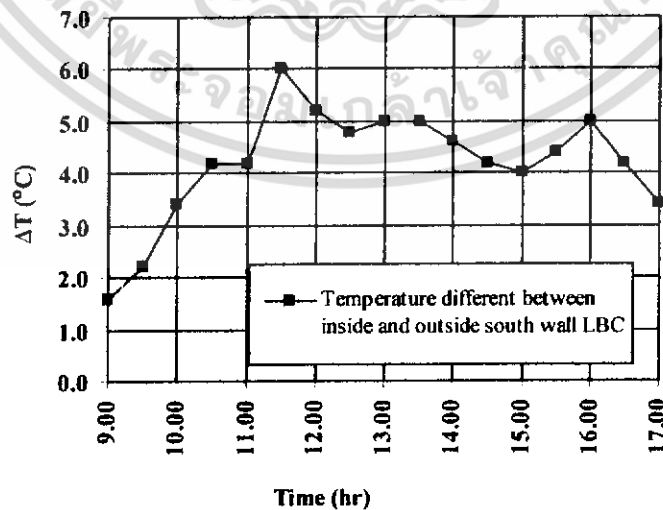
จากรูปที่ 4.17 ผลต่างอุณหภูมิผนังด้านนอกกับด้านในของอิฐมวลเบาผสมเถ้าลอยเคลือบด้านทิศใต้ จะมีค่าเฉลี่ยประมาณ 4.2 องศาเซลเซียส ซึ่งผนังทิศใต้ จะถูกแสงแดดในเวลาประมาณ 11.00-15.00 นาฬิกา



รูปที่ 4.17 ผลต่างอุณหภูมิผนังด้านนอกกับด้านในของอิฐมวลเบาผสมเถ้าลอยเคลือบด้านทิศใต้

#### 4.2.8 ผลต่างอุณหภูมิผนังด้านนอกกับด้านในของอิฐมวลเบาผสมเถ้าลอยเคลือบด้านทิศเหนือ

จากรูปที่ 4.18 ผลต่างอุณหภูมิผนังด้านนอกกับด้านในของอิฐมวลเบาผสมเถ้าลอยเคลือบด้านทิศตะวันออก จะมีค่าเฉลี่ยประมาณ 2.5 องศาเซลเซียส ซึ่งผนังทิศเหนือจะไม่ถูกแสงแดดแต่มีการแผ่ของแสงแดด



รูปที่ 4.18 ผลต่างอุณหภูมิผนังด้านนอกกับด้านในของอิฐมวลเบาผสมเถ้าลอยเคลือบด้านทิศเหนือ

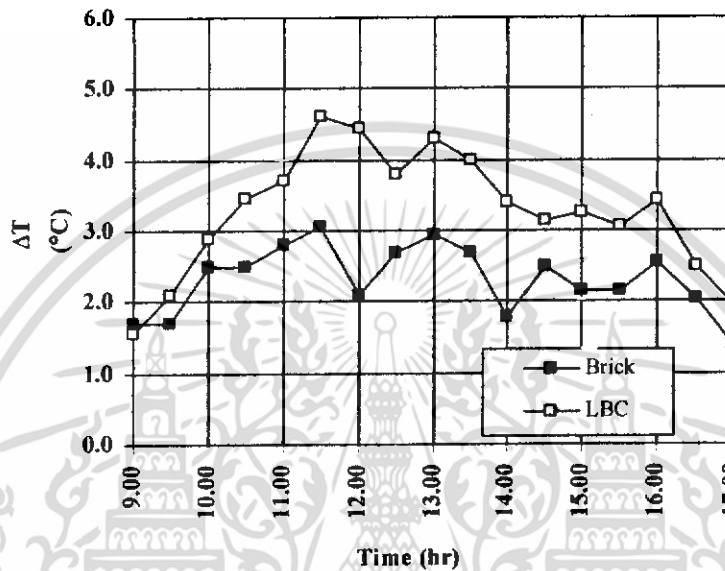
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.9 เปรียบเทียบผลต่างอุณหภูมิผนังด้านนอกกับด้านในของอิฐมวลเบาผสมเถ้า

##### ลอยแกลบ

จากรูปที่ 4.19 จะพบว่าผลต่างอุณหภูมิผนังด้านนอกกับด้านในของอิฐมวลเบาผสมเถ้าลอยแกลบ จะมีผลต่างของอุณหภูมิเฉลี่ยมากกว่าอุณหภูมิของผนังอิฐมวลประมาณ 1.0-1.5 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.19 เปรียบเทียบผลต่างอุณหภูมิผนังด้านนอกกับด้านในของอิฐมวลเบาผสมเถ้าลอยแกลบ

## บทที่ 5

### สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการศึกษา

จากการนำถั่วลอยมาประยุกต์ใช้เป็นวัสดุผสมในอิฐมวลเบาของบริษัท Professional Block จำกัด ซึ่งจะได้นำไปพัฒนาในการผลิตอิฐมวลเบา ทำให้ช่วยลดต้นทุนการผลิตของทางบริษัท โดยการใช้ถั่วลอยถ่านหินและถั่วลอยแกลบที่ร้อยละ 10, 12.5, 15, และ 20 โดยน้ำหนักสามารถสรุปผลการศึกษาดังต่อไปนี้

- การใช้ถั่วลอยเป็นส่วนผสมมีผลทำให้ค่าความแข็งแรง (Compressive strength) ของอิฐมวลเบา มีค่าสูงขึ้นจากของเดิมที่บริษัทผลิต
- ที่อัตราส่วนผสมถั่วลอยร้อยละ 12.5 จะให้ค่าความแข็งแรงสูงสุด โดยอิฐมวลเบาที่ผสมถั่วลอยแกลบจะมีค่าความแข็งแรงเพิ่มขึ้นจากอิฐมวลเบาสูตรเดิมประมาณ 50%
- ขณะที่ค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity) นั้น พบว่ามีค่าลดลงตามอัตราส่วนผสมของถั่วลอยที่เพิ่มขึ้น (มีความเป็นฉนวนดีขึ้น) โดยอิฐมวลเบาที่ผสมถั่วลอยแกลบจะมีค่าการนำความร้อนลดลงประมาณ 22 % จากของเดิมที่บริษัทผลิต
- การใช้ถั่วลอยเป็นส่วนผสมมีผลทำให้ค่าความหนาแน่นของอิฐมวลเบา มีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 12.5% จากของเดิมที่บริษัทผลิต

จากตารางที่ 5.1 พบว่า ค่าอิฐต่อตารางเมตรในการสร้างผนังอาคาร สำหรับอิฐมวลเบาผสมถั่วลอยแกลบ ลดลงจากอิฐมวลเบาสูตรเดิมประมาณ 33% ทั้งนี้เป็นเพราะเมื่อผสมถั่วลอยแกลบแล้ว ทำให้มีการใช้น้ำเพิ่มขึ้นประมาณ 36% แต่สามารถลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์และทรายลงได้ประมาณ 25% โดยรวมแล้วจึงสามารถลดค่าใช้จ่ายต่อตารางเมตรในการสร้างผนังอาคารลงได้ประมาณ 14%

ตารางที่ 5.1 เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการสร้างผนังอาคาร โดยใช้อิฐแบบต่างๆ (บาทต่อตารางเมตร)

	อิฐมวลเบาเดิมของบริษัทฯ	อิฐมอญ	อิฐมวลเบาผสมถั่วลอยแกลบ ร้อยละ 12.5
1. ค่าอิฐ	150	75	100
2. ค่าปูนก่อ	12	60	12
3. ค่าปูนฉาบ	58	70	58
4. ค่าแรงในการก่อ - ฉาบ	150	170	150
รวม	370	375	320

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปเผยแพร่หรือใช้ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.7 ข้อเสนอแนะเพิ่มเติม

5.1.1 เครื่องไม่ผสมควรจะมีลักษณะของใบผสมที่จะทำให้เกิดการคลุกเคล้าได้ดี (การคึงส่วนผสมเข้าส่วนกลาง) เนื่องจากโฟมอินทรีย์ เมื่อทำการฉีดยาจะลอยตัวอยู่ด้านบน

5.1.2 การทำตัวอย่างทดสอบค่าความแข็งแรง ในขั้นตอนการฉีดโฟมอินทรีย์เสร็จแล้ว ไม่ควรจะใช้เวลาในการผสมนานเกินไป เพราะจะทำให้เนื้อของอิฐมวลเบามีความพรุนมากเกินไป ซึ่งทำให้ค่าความแข็งแรงมีค่าที่ต่ำ

5.1.3 การทำตัวอย่างทดสอบค่าความแข็งแรงและค่าการนำความร้อน ควรจะทำมากกว่า 3 ตัวอย่าง เพราะจะทำให้ผลการทดลองมีความถูกต้องมากขึ้น

5.1.4 การผสมตัวอย่างทดสอบควรมีถุงมือและผ้าปิดจมูก เพื่อป้องกันฝุ่นจากเถ้าลอยและปูนซีเมนต์

5.1.5 สายเทอร์โมคัปเปิ้ลที่ใช้วัดอุณหภูมิกลางห้องควรเป็นสายที่มีขนาดเล็ก เพื่อจะทำให้ค่าอุณหภูมิที่อ่านได้มีค่าความผิดพลาดน้อยลง

5.1.6 ควรเก็บข้อมูลในช่วงที่มีแสงแดดสม่ำเสมอ เพื่อจะได้ทราบถึงผลต่างของอุณหภูมิของผนังภายนอกและภายใน ระหว่างอิฐมวลเบากับอิฐมวลเบาที่ผสมเถ้าลอยเคลือบ

5.1.7 การสร้างห้องทดสอบควรใช้ช่างที่มีประสบการณ์ ในการก่อสร้างอิฐมวลเบา

5.1.8 การทำตัวอย่างทดสอบค่าความแข็งแรง ควรเทส่วนผสมให้ล้นจากแบบหล่อลูกปูน เพื่อป้องกันการยุบตัวบริเวณส่วนหัวของตัวอย่างทดสอบค่าความแข็งแรง

5.1.9 การบ่มลูกปูนเพื่อทดสอบค่าความแข็งแรง ควรบ่มในน้ำโดยให้น้ำท่วมลูกปูน เพื่อเพิ่มค่าความแข็งแรง

## หนังสืออ้างอิง

1. สัญชัย สอาดกิตินันท์ และ เจษฎา เกษมเศรษฐ์, 2546, “การออกแบบส่วนผสมคอนกรีตกำลังอัดกำลังสูงผสมเถ้าลอยแม่เมาะแบบคัดและไม่คัดแยกขนาดโดยปรับปรุงมาตรฐานเอซีไอ,” วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 11(3) : หน้า 176-185
2. เมธี เวชารัตนา, 2548, เถ้าลอยโรงไฟฟ้าแม่เมาะขยะพื้นล้าน,  
[Online], Available : <http://www.Environment.in.th>.
3. บุรฉัตร ฉัตรวีระ, ณรงค์ศักดิ์ มากุล และ บัณฑิต รักษาดี, 2547, “การใช้เถ้าแกลบไม่บดในการผลิตคอนกรีตบล็อก,” วารสารวิจัยและพัฒนา มจร, 27 : หน้า 483-496
4. ปริญา จินดาประเสริฐ และ อินทรชัย หอวิจิตร, 2530, “การศึกษาปอร์แลนด์ซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบและเถ้าลอย”, สำนักงานเทคโนโลยีเพื่อพัฒนาชนบท, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
5. สมชัย อัครทิวา และ ขวัญจิต วงษ์ขารี, 2546, เทอร์โมไดนามิกส์, กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์ท็อป : หน้า 72-75
6. อนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุ คณะกรรมการวิชาการสาขาวิศวกรรมโยธา วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์, 2547, การใช้เถ้าลอยในงานคอนกรีต, พิมพ์ครั้งที่ 2, กรุงเทพฯ : หน้า 3-13
7. รุ่งสุรีย์ ใจเขื่อนแก้ว, 2545, กตศาสตร์ของวัสดุ, กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์ท็อป : หน้า 1-5
8. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 1505-2541, ชิ้นส่วนคอนกรีตมวลเบาแบบมีฟองอากาศ-อบไอน้ำ, สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, กระทรวงอุตสาหกรรม : หน้า 2-3
9. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, ASTM C-192, สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, กระทรวงอุตสาหกรรม.
10. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, ASTM C-192, สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, กระทรวงอุตสาหกรรม.
11. ACI Committee 226, 1992, “Use of fly ash in concrete, ACI 226.3R-87,” ACI Manual of Concrete Practice Part I, pp29.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก.1

## ผลการทดสอบค่าความแข็งแรง

ค่าความแข็งแรงของการใช้เส้นลวดผ่านหินคัดแยก ขนาด  $\phi < 150 \mu\text{m}$  ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก

DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING

FACULTY OF ENGINEERING, KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY

LADKRABANG BANGKOK THAILAND. TEL. 0-2326-4216



## CONCRETE COMPRESSIVE STRENGTH TEST

PROJECT : การใช้ประโยชน์จากซีเมนต์สำหรับผลิตอิฐมวลเบา      Req. No.      48-958  
 SAMPLE FROM : นายคุณณะ เจริญคลัง      Date of Request      19-Sep-05  
 CONTRACTOR :      Date of Submission      23-Sep-05

Spec. No.	Code	Cross Sectional Area (cm <sup>2</sup> )	Height of Specimen (cm)	Weight of Specimen (kg)	Slump of Concrete (cm)	Date of Casting (d/m/y)	Date of Testing (d/m/y)	Ages (days)	Ultimate Load (kg)	Comp. Strength (ksc)	Weight per Volume (kg/cu.m.)	Remarks
1	ชุดที่ 6	176.80	30.00	6.460	-	21-Aug-05	19-Sep-05	29	6,487	36.69	1,217.92	
2	ชุดที่ 6	176.92	29.90	6.470	-	21-Aug-05	19-Sep-05	29	9,409	53.18	1,223.06	
3	ชุดที่ 6	176.86	30.00	6.350	-	21-Aug-05	19-Sep-05	29	6,000	33.93	1,196.78	

- การใช้ซีเมนต์ผ่านหินคัดแยกขนาดต่ำกว่า 150 $\mu\text{m}$
- จำนวนร้อยละ 20 ของวัสดุประสาน

TYPE OF SAMPLE :  CYLINDER     CUBE    TESTED BY:    Mr. CHAIYA AUMBUN

METHOD OF CAST :    MANUAL

Note: 1) CERTIFICATION APPLIES TO TEST SAMPLES ONLY. CE

2) NO ERASURE OR ALTERATIONS.

3) THERE ARE THREE TESTED SAMPLES FOR THIS DATA SHEET.



Date: 23-Sep-05

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก.2

ค่าความแข็งแรงของการใช้เส้นลวดผ่านหินคัดแยก ขนาด  $\phi < 150 \mu\text{m}$  ร้อยละ 12.5 โดยน้ำหนัก

DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING

FACULTY OF ENGINEERING, KING MONKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY

LADKRABANG BANGKOK THAILAND. TEL. 0-2326-4216



## CONCRETE COMPRESSIVE STRENGTH TEST

PROJECT : การใช้ประโยชน์จากซีเมนต์ลวดสำหรับผลิตอิฐมวลเบา Req. No. 48-958  
 SAMPLE FROM : นากฤชณะ เจริญคลัง Date of Request 19-Sep-05  
 CONTRACTOR : Date of Submission 23-Sep-05

Spec. No.	Code	Cross Sectional Area (cm <sup>2</sup> )	Height of Specimen (cm)	Weight of Specimen (kg)	Slump of Concrete (cm)	Date of Casting (d/m/y)	Date of Testing (d/m/y)	Ages (days)	Ultimate Load (kg)	Comp. Strength (ksc)	Weight per Volume (kg/cu.m.)	Remarks
1	จุดที่ 7	176.98	29.90	7.730	-	21-Aug-05	19-Sep-05	29	16,419	92.77	1,460.75	
2	จุดที่ 7	176.86	29.80	7.300	-	21-Aug-05	19-Sep-05	29	15,881	89.79	1,385.06	
3	จุดที่ 7	176.86	29.80	7.440	-	21-Aug-05	19-Sep-05	29	11,986	67.77	1,411.62	

- การใช้ซีเมนต์ผ่านหินคัดแยกขนาดต่ำกว่า 150 $\mu\text{m}$

- จำนวนร้อยละ 25 ของวัสดุประสาน

TYPE OF SAMPLE :  CYLINDER  CUBE TESTED BY: Mr. CHAIYA AUMBUN

METHOD OF CAST : MANUAL

Note: 1) CERTIFICATION APPLIES TO TEST SAMPLES ONLY. CERTIFIED BY

2) NO ERASURE OR ALTERATIONS.

3) THERE ARE THREE TESTED SAMPLES FOR THIS DATA SHEET.



23-Sep-05

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก.3

ค่าความแข็งแรงของการใช้เถ้าลอยถ่านหินคัดแยก ขนาด  $\phi < 150 \mu\text{m}$  ร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก

DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING

FACULTY OF ENGINEERING, KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY

LADKRABANG BANGKOK THAILAND. TEL. 0-2326-4216



CONCRETE COMPRESSIVE STRENGTH TEST

PROJECT : การใช้ประโยชน์จากเถ้าลอยสำหรับผลิตอิฐมวลเบา Req. No. 48-1129  
 SAMPLE FROM : นายฤกษ์ชัย เจริญกิจ Date of Request 21-Nov-05  
 CONTRACTOR : Date of Submission 24-Nov-05

Spec. No.	Code	Cross Sectional Area (cm <sup>2</sup> )	Height of Specimen (cm)	Weight of Specimen (kg)	Slump of Concrete (cm)	Date of Casting (d/m/y)	Date of Testing (d/m/y)	Ages (days)	Ultimate Load (kg)	Comp. Strength (ksc)	Weight per Volume (kg/cu.m.)	Remarks
1	จุดที่ 1	176.68	28.90	6.622	-	24-Oct-05	21-Nov-05	28	7,329	41.48	1,296.86	
2	จุดที่ 1	176.50	28.50	6.414	-	24-Oct-05	21-Nov-05	28	8,496	48.14	1,275.05	

- การใช้เถ้าถ่านหินขนาดต่ำกว่า 150 $\mu\text{m}$  ร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก

TYPE OF SAMPLE :  CYLINDER  CUBE TESTED BY: Mr. CHAIYA AUMBUN  
 METHOD OF CAST : MANUAL

Note: 1) CERTIFICATION APPLIES TO TEST SAMPLES ONLY. CERTIFIED BY:

2) NO ERASURE OR ALTERATIONS.

3) THERE ARE TWO TESTED SAMPLES FOR THIS DATA SHEET.

Date: 24-Nov-05

Mr. Chaiya Aumbun

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.4

ค่าความแข็งแรงของการใช้เถ้าลอยผ่านหินคัดแยก ขนาด  $\phi < 150 \mu\text{m}$  ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก

DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING, KING MONKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY  
LADKRABANG BANGKOK THAILAND. TEL. 0-2326-4216



CONCRETE COMPRESSIVE STRENGTH TEST

PROJECT : การใช้ประโยชน์จากเถ้าลอยสำหรับผลิตอิฐมวลเบา  
SAMPLE FROM : นายกฤษณะ เจริญคลัง  
CONTRACTOR :  
Req. No. 48-958  
Date of Request 19-Sep-05  
Date of Submission 23-Sep-05

Spec. No.	Code	Cross Sectional Area (cm <sup>2</sup> )	Height of Specimen (cm)	Weight of Specimen (kg)	Slump of Concrete (cm)	Date of Casting (d/m/y)	Date of Testing (d/m/y)	Ages (days)	Ultimate Load (kg)	Comp. Strength (ksc)	Weight per Volume (kg/cu.m.)	Remarks
1	ชุดที่ 8	176.92	29.80	6.200	-	21-Aug-05	19-Sep-05	29	5,595	31.52	1,175.95	
2	ชุดที่ 8	177.04	30.00	6.410	-	21-Aug-05	19-Sep-05	29	6,579	37.16	1,206.86	
3	ชุดที่ 8	176.86	29.80	6.190	-	21-Aug-05	19-Sep-05	29	4,945	27.96	1,174.45	

- การใช้เถ้าผ่านหินคัดแยกขนาดต่ำกว่า 150µm
- จำนวนร้อยละ 40 ของวัสดุประสาน

TYPE OF SAMPLE :  CYLINDER  CUBE TESTED BY: Mr. CHAIYA AUMBUN  
METHOD OF CAST : MANUAL

Note: 1) CERTIFICATION APPLIES TO TEST SAMPLES ONLY. CER

2) NO ERASURE OR ALTERATIONS.

3) THERE ARE THREE TESTED SAMPLES FOR THIS DATA SHEET.



Date 23-Sep-05

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.5

ค่าความแข็งแรงของการใช้เส้นลวดผ่านหินคัดแยก ขนาด  $\phi$  150 – 300  $\mu\text{m}$  ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก

DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING

FACULTY OF ENGINEERING, KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY

LADKRABANG BANGKOK THAILAND, TEL. 0-2326-4216



CONCRETE COMPRESSIVE STRENGTH TEST

PROJECT : การใช้ประโยชน์จากซีเมนต์ลวดสำหรับผลิตอิฐมวลเบา  
 SAMPLE FROM : นายกฤษณะ เจริญคลัง  
 CONTRACTOR :  
 Req. No. 48-958  
 Date of Request 19-Sep-05  
 Date of Submission 23-Sep-05

Spec. No.	Code	Cross Sectional Area (cm <sup>2</sup> )	Height of Specimen (cm)	Weight of Specimen (kg)	Slump of Concrete (cm)	Date of Casting (d/m/y)	Date of Testing (d/m/y)	Ages (days)	Ultimate Load (kg)	Comp. Strength (ksc)	Weight per Volume (kg/cu.m)	Remarks
1	ชุดที่ 2	176.98	29.90	6.600	-	21-Aug-05	19-Sep-05	29	7,177	40.55	1,247.21	
2	ชุดที่ 2	176.74	30.00	6.240	-	21-Aug-05	19-Sep-05	29	9,064	51.28	1,176.84	
3	ชุดที่ 2	176.86	29.80	5.980	-	21-Aug-05	19-Sep-05	29	8,364	47.29	1,134.61	

- การใช้เส้นลวดผ่านหินคัดแยกขนาด 150 $\mu\text{m}$  - 300 $\mu\text{m}$
- จำนวนร้อยละ 20 ของวัสดุประสาน

TYPE OF SAMPLE :  CYLINDER  CUBE TESTED BY: Mr. CHAIYA AUMBUN  
 METHOD OF CAST : MANUAL

Note: 1) CERTIFICATION APPLIES TO TEST SAMPLES ONLY. CE

2) NO ERASURE OR ALTERATIONS.

3) THERE ARE THREE TESTED SAMPLES FOR THIS DATA SHEET. Date



23-Sep-05

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.6

ค่าความแข็งแรงของการใช้เส้นลวดผ่านหินคัดแยก ขนาด  $\phi$  150 – 300  $\mu\text{m}$  ร้อยละ 12.5 โดยน้ำหนัก

DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING

FACULTY OF ENGINEERING, KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY

LADKRABANG BANGKOK THAILAND. TEL. 0-2326-4216



CONCRETE COMPRESSIVE STRENGTH TEST

PROJECT : การให้ประโยชน์จากซีเมนต์สำหรับผลิตอิฐมวลเบา      Req. No.      48-958  
 SAMPLE FROM : นายกฤษณะ เจริญคลัง      Date of Request      19-Sep-05  
 CONTRACTOR :      Date of Submission      23-Sep-05

Spec. No.	Code	Cross Sectional Area (cm <sup>2</sup> )	Height of Specimen (cm)	Weight of Specimen (kg)	Slump of Concrete (cm)	Date of Casting (d/m/y)	Date of Testing (d/m/y)	Ages (days)	Ultimate Load (kg)	Comp. Strength (ksc)	Weight per Volume (kg/cu m.)	Remarks
1	ชุดที่ 3	176.92	30.00	6.280	-	20-Aug-05	19-Sep-05	30	10,089	57.02	1,183.19	
2	ชุดที่ 3	176.92	30.00	6.250	-	20-Aug-05	19-Sep-05	30	10,129	57.25	1,177.53	
3	ชุดที่ 3	176.98	30.20	6.500	-	20-Aug-05	19-Sep-05	30	8,973	50.70	1,216.11	

- การใช้ซีเมนต์ผ่านหินคัดแยกขนาด 150 $\mu\text{m}$  - 300 $\mu\text{m}$

- จำนวนร้อยละ 25 ของวัสดุประสาน

TYPE OF SAMPLE :  CYLINDER     CUBE    TESTED BY:    Mr. CHAIYA AUMBUN

METHOD OF CAST :    MANUAL

Note: 1) CERTIFICATION APPLIES TO TEST SAMPLES ONLY. CE

2) NO ERASURE OR ALTERATIONS.

3) THERE ARE THREE TESTED SAMPLES FOR THIS DATA SHEET.



23-Sep-05

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.7

ค่าความแข็งแรงของการใช้เส้นลวดผ่านหินตัดแยก ขนาด  $\phi$  150 - 300  $\mu$ m ร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก

DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING

FACULTY OF ENGINEERING, KING MONKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY

LADKRABANG BANGKOK THAILAND. TEL. 0-2326-4216



CONCRETE COMPRESSIVE STRENGTH TEST

PROJECT : การใช้ประโยชน์จากซีเมนต์ลวดสำหรับผลิตอิฐมวลเบา  
 SAMPLE FROM : นายกฤษณะ เจริญกิจ  
 CONTRACTOR :  
 Req. No. 48-1129  
 Date of Request 21-Nov-05  
 Date of Submission 24-Nov-05

Spec. No.	Code	Cross Sectional Area (cm <sup>2</sup> )	Height of Specimen (cm)	Weight of Specimen (kg)	Slump of Concrete (cm)	Date of Casting (d/m/y)	Date of Testing (d/m/y)	Ages (days)	Ultimate Load (kg)	Comp. Strength (ksc)	Weight per Volume (kg/cu.m.)	Remarks
1	ชุดที่ 2	176.80	30.00	6.227	-	24-Oct-05	21-Nov-05	28	7,015	39.68	1,174.00	
2	ชุดที่ 2	176.68	29.80	5.963	-	24-Oct-05	21-Nov-05	28	5,696	32.24	1,132.53	
3	ชุดที่ 2	176.74	30.00	6.034	-	24-Oct-05	21-Nov-05	28	5,808	32.86	1,137.99	

- การใช้เส้นลวดผ่านหินขนาด 150 - 300  $\mu$ m ร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก

TYPE OF SAMPLE :  CYLINDER  CUBE TESTED BY: Mr. CHAIYA AUMBUN  
 METHOD OF CAST : MANUAL

Note: 1) CERTIFICATION APPLIES TO TEST SAMPLES ONLY. CERTIFIED BY:

2) NO FRASURE OR ALTERATIONS.

3) THERE ARE THREE TESTED SAMPLES FOR THIS DATA SHEET. Date

24-Nov-05

ศส.เสกวิชัย สกลาภทรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.8

ค่าความแข็งแรงของการใช้เส้นลวดผ่านหินคัดแยก ขนาด  $\phi$  150 - 300  $\mu$ m ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก

DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING

FACULTY OF ENGINEERING, KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY

LADKRABANG BANGKOK THAILAND. TEL. 0 - 2326 - 4216



CONCRETE COMPRESSIVE STRENGTH TEST

PROJECT : การใช้ประโยชน์จากเส้นลวดสำหรับผลิตอิฐมวลเบา      Req. No.      48-958  
 SAMPLE FROM : นายกฤษณะ เจริญคลัง      Date of Request      19-Sep-05  
 CONTRACTOR :      Date of Submission      23-Sep-05

Spec. No.	Code	Cross Sectional Area (cm <sup>2</sup> )	Height of Specimen (cm)	Weight of Specimen (kg)	Slump of Concrete (cm)	Date of Casting (d/m/y)	Date of Testing (d/m/y)	Ages (days)	Ultimate Load (kg)	Comp. Strength (ksc)	Weight per Volume (kg/cu m)	Remarks
1	ชุดที่ 4	176.92	30.00	6.03	-	20-Aug-05	19-Sep-05	30	8,577	48.48	1,136.08	
2	ชุดที่ 3	176.80	29.90	5.920	-	20-Aug-05	19-Sep-05	30	6,670	37.73	1,119.85	
3	ชุดที่ 4	176.80	29.90	5.900	-	20-Aug-05	19-Sep-05	30	7,553	42.72	1,116.07	

- การใช้เส้นลวดผ่านหินคัดแยกขนาด 150 $\mu$ m - 300 $\mu$ m

- จำนวนร้อยละ 40 ของวัสดุประสาน

TYPE OF SAMPLE :  CYLINDER     CUBE    TESTED BY:    Mr. CHAIYA AUMBUN

METHOD OF CAST :    MANUAL

Note: 1) CERTIFICATION APPLIES TO TEST SAMPLES ONLY. CE 0110

2) NO ERASURE OR ALTERATIONS.

3) THERE ARE THREE TESTED SAMPLES FOR THIS DATA SHEET.



23-Sep-05

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.9

ค่าความแข็งแรงของการใช้เถ้าลอยเกรดขนาด  $\phi < 150 \mu\text{m}$  ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก

DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING

FACULTY OF ENGINEERING, KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY

LADKRABANG BANGKOK THAILAND. TEL. 0-2326-4216



CONCRETE COMPRESSIVE STRENGTH TEST

PROJECT : การใช้ประโยชน์จากซีเมนต์ลอย สำหรับผลิตอิฐมวลเบา      Req. No.      48-1030  
 SAMPLE FROM : นายกฤษณะ เจริญคลัง      Date of Request      11-Oct-05  
 SAMPLE DESCRIPTION :      Date of Submission      14-Oct-05

Spec. No.	Code	Cross Sectional Area (cm <sup>2</sup> )	Height of Specimen (cm)	Weight of Specimen (kg)	Slump of Concrete (cm)	Date of Casting (d/m/y)	Date of Testing (d/m/y)	Ages (days)	Ultimate Load (kg)	Comp. Strength (ksc)	Weight per Volume (kg/cu.m.)	Remarks
1	ชุดที่ 2	176.98	30.00	5.630	-	10-Sep-05	11-Oct-05	31	3,667	20.72	1,060.36	
2	ชุดที่ 2	177.10	30.10	5.540	-	10-Sep-05	11-Oct-05	31	5,980	33.77	1,039.24	
3	ชุดที่ 2	177.10	30.00	5.430	-	10-Sep-05	11-Oct-05	31	4,753	26.84	1,022.00	


- ใช้ซีเมนต์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก

TYPE OF SAMPLE :  CYLINDER     CUBE    TESTED BY: Mr. CHAIYA AUMBUN  
 METHOD OF CAST :      MANUAL

Note: 1) CERTIFICATION APPLIES TO TEST SAMPLES ONLY.

2) NO ERASURE OR ALTERATIONS.

3) THERE ARE THREE TESTED SAMPLES FOR THIS DATA SHEET.

CERTIFIED BY:   
 รศ.ศิริวัฒน์ ไชยชนะ

Date

14-Oct-05

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.10

ค่าความแข็งแรงของการใช้เส้นใยแก้วขนาด  $\phi < 150 \mu\text{m}$  ร้อยละ 12.5 โดยน้ำหนัก

DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING

FACULTY OF ENGINEERING, KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY

LADKRABANG BANGKOK THAILAND. TEL. 0-2326-4216



CONCRETE COMPRESSIVE STRENGTH TEST

PROJECT : การใช้ประโยชน์จากซีเมนต์ใยแก้ว สำหรับผลิตอิฐมวลเบา Req. No. 48-1030  
 SAMPLE FROM : นายกฤษณะ เจริญคลัง Date of Request 11-Oct-05  
 SAMPLE DESCRIPTION : Date of Submission 14-Oct-05

Spec. No.	Code	Cross Sectional Area (cm <sup>2</sup> )	Height of Specimen (cm)	Weight of Specimen (kg)	Slump of Concrete (cm)	Date of Casting (d/m/y)	Date of Testing (d/m/y)	Ages (days)	Ultimate Load (kg)	Comp. Strength (ksc)	Weight per Volume (kg/cu.m.)	Remarks
1	ชุดที่ 3	176.68	29.80	5.930	-	10-Sep-05	11-Oct-05	31	5,179	29.31	1,126.27	
2	ชุดที่ 3	176.80	29.80	5.800	-	10-Sep-05	11-Oct-05	31	4,844	27.40	1,100.83	
3	ชุดที่ 3	176.86	30.00	5.490	-	10-Sep-05	11-Oct-05	31	5,108	28.88	1,034.70	

- ใช้ซีเมนต์ใยแก้วร้อยละ 12.5 โดยน้ำหนัก

TYPE OF SAMPLE :  CYLINDER  CUBE TESTED BY: Mr. CHAIYA AUMBUN

METHOD OF CAST : MANUAL

Note: 1) CERTIFICATION APPLIES TO TEST SAMPLES ONLY.

2) NO ERASURE OR ALTERATIONS.

3) THERE ARE THREE TESTED SAMPLES FOR THIS DATA SHEET.

CERTIFIED BY:



รศ.ศิริวัฒน์ ไชยชนะ

Date

14-Oct-05

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.11

ค่าความแข็งแรงของการใช้เส้นลวดเหล็ก ขนาด  $\phi < 150 \mu\text{m}$  ร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก

DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING

FACULTY OF ENGINEERING, KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY

LADKRABANG BANGKOK THAILAND. TEL. 0-2326-4216



CONCRETE COMPRESSIVE STRENGTH TEST

PROJECT : การใช้ประโยชน์จากซีเมนต์ลวดเหล็กสำหรับผลิตอิฐมวลเบา      Req. No.      48-1129  
 SAMPLE FROM : นายฤกษ์ ตรีคุณ      Date of Request      21-Nov-05  
 CONTRACTOR :      Date of Submission      24-Nov-05

Spec. No.	Code	Cross Sectional Area (cm <sup>2</sup> )	Height of Specimen (cm)	Weight of Specimen (kg)	Slump of Concrete (cm)	Date of Casting (d/m/y)	Date of Testing (d/m/y)	Ages (days)	Ultimate Load (kg)	Comp. Strength (ksc)	Weight per Volume (kg/cu.m.)	Remarks
1	ชุดที่ 3	176.92	29.90	5.218	-	24-Oct-05	21-Nov-05	28	3,018	17.06	986.39	
2	ชุดที่ 3	177.04	30.00	5.450	-	24-Oct-05	21-Nov-05	28	3,414	19.28	1,026.11	

- การใช้ซีเมนต์ลวดเหล็ก ร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก

TYPE OF SAMPLE :  CYLINDER     CUBE    TESTED BY:    Mr. CHAIYA AUMBUN  
 METHOD OF CAST :    MANUAL

Note: 1) CERTIFICATION APPLIES TO TEST SAMPLES ONLY. CERTIFIED BY:

2) NO ERASURE OR ALTERATIONS.

3) THERE ARE TWO TESTED SAMPLES FOR THIS DATA SHEET.

Date

24-Nov-05

Mr. Chaiya Aumbun    สภาฯ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก.12

ค่าความแข็งแรงของการใช้เถ้าลอยแกลบ ขนาด  $\phi < 150 \mu\text{m}$  ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก

DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING

FACULTY OF ENGINEERING, KING MONKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY

LADKRABANG BANGKOK THAILAND, TEL. 0-2326-4216



## CONCRETE COMPRESSIVE STRENGTH TEST

PROJECT : การใช้ประโยชน์จากเถ้าลอย สำหรับผลิตอิฐมวลเบา      Req. No.      48-1030  
 SAMPLE FROM : นายฤกษ์ เจริญศักดิ์      Date of Request      11-Oct-05  
 SAMPLE DESCRIPTION :      Date of Submission      14-Oct-05

Spec. No.	Code	Cross Sectional Area (cm <sup>2</sup> )	Height of Specimen (cm)	Weight of Specimen (kg)	Slump of Concrete (cm)	Date of Casting (d/m/y)	Date of Testing (d/m/y)	Ages (days)	Ultimate Load (kg)	Comp. Strength (ksc)	Weight per Volume (kg/cu.m.)	Remarks
1	ชุดที่ 4	176.80	29.70	5.800	-	10-Sep-05	11-Oct-05	31	4,053	22.92	1,104.34	
2	ชุดที่ 4	176.92	29.80	5.400	-	10-Sep-05	11-Oct-05	31	3,566	20.15	1,024.22	
3	ชุดที่ 4	176.98	30.00	5.530	-	10-Sep-05	11-Oct-05	31	3,870	21.87	1,041.53	

- ใช้เถ้าลอยร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก

TYPE OF SAMPLE :  CYLINDER  CUBE TESTED BY: Mr. CHAIYA AUMBUN

METHOD OF CAST : MANUAL

Note: 1) CERTIFICATION APPLIES TO TEST SAMPLES ONLY. CERTIFIED

2) NO ERASURE OR ALTERATIONS.

3) THERE ARE THREE TESTED SAMPLES FOR THIS DATA SHEET.

Date

14-Oct-05

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้